Paula Birocchi

**Estudo do impacto de efluentes dos emissários
submarinos nas áreas adjacentes ao canal de
São Sebastião, SP**

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico
da Universidade de São Paulo, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Mestre em
Ciências, Programa de Oceanografia, área de Oceanografia Física.

Orientador:

Prof. Dr. Marcelo Dottori

São Paulo

2018

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO OCEANOGRÁFICO**

**Estudo do impacto de efluentes dos emissários
submarinos nas áreas adjacentes ao canal de
São Sebastião, SP**

Paula Birocchi

VERSÃO CORRIGIDA

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como
parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de
Oceanografia, área de Oceanografia Física.

Julgada em ____ / ____ / ____

Prof. Dr.

Conceito

Prof. Dr.

Conceito

Prof. Dr.

Conceito

*Dedico esse trabalho aos meus pais, ao meu avô paterno Oswaldo Birocchi
e as minhas avó e bisávo maternas Cida e Nena.*

“Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar,
divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais
bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua
misterioso diante de meus olhos” - Isaac Newton

Sumário

Resumo	viii
Abstract	ix
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xix
1 Introdução	1
1.1 A poluição marinha	1
1.2 Emissários submarinos	1
1.2.1 Processos de mistura	4
1.3 Área de estudo	6
1.3.1 Poluição e emissários na região	8
1.4 Motivação	12
1.5 Hipótese	14
1.6 Objetivos	15
2 Material e Métodos	16
2.1 Modelagem	17
2.1.1 O modelo hidrodinâmico sECOM	17
2.1.2 Acoplamento de Campo Próximo e Campo Afastado	30
2.1.3 Módulo de Qualidade de Água: Trajetória de Traçadores ou Pa- tógenos	32
2.1.4 Indicador de poluição: coliformes termotolerantes	34
2.2 Cenários	36
2.3 Interpretação de resultados	37
2.3.1 Validação qualitativa do módulo de dispersão bacteriana	37
2.3.2 Divisão do CSS em setores	38
2.3.3 Persistência no tempo	39
3 Resultados e Discussão	40

3.1	Interpretação de dados	40
3.2	Modelagem Hidrodinâmica (sECOM)	46
3.2.1	Validação	46
3.3	Modelagem do Campo Próximo	52
3.3.1	Plumas dos emissários	53
3.3.2	Séries temporais do campo próximo	62
3.3.3	Histogramas direcionais	72
3.4	Acoplamento de Campo Próximo e Campo Afastado	79
3.4.1	Validação qualitativa do módulo de dispersão bacteriana	79
3.4.2	Setores	93
3.4.3	Persistência no tempo	118
4	Conclusões	137
	Referências	142

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer a minha família. Agradeço aos melhores pais que alguém poderia ter, Assis e Renata, por todo o apoio desde o início dos meus estudos, por acreditarem em mim e na oceanografia. Aos meus irmãos, Camila e Bruno pelo companheirismo e pelas risadas. Eu amo vocês mais do que tudo.

Agradeço:

Ao meu orientador, Marcelo, pelo apoio, pela confiança e pelos conselhos durante o mestrado.

Ao corpo docente do programa de Oceanografia Física: Belmiro Castro, Joseph Harari, Olga Sato, Paulo Polito, Ilson Silveira e Luiz Miranda. Obrigada por transmitirem os seus conhecimentos.

Aos meus amigos e colegas de trabalho do LHiCO: João Fortes, Guilherme Seki, Iago Leitão, José Roberto Leite, Vanessa, Victor, Sérgio, Juliana Mancio e, em especial, Carine Costa, Rafaela Nascimento, Pedro Moraes e Thiago Parente obrigada por todo o apoio, auxílio e risadas seja em São Paulo, ou à distância. Danilo e Dalton, verdadeiros amigos, obrigada por tudo, por estarem ali para me ajudar sempre, por todos os cafés, cervejas, ensinamentos de Python e experiências compartilhadas.

Aos meus amigos da turma 9 que fazem São Paulo se tornar muito mais divertida: Gabi, Mari Tawata, Sandrinha, Chorume, Debinha, Marina e Stella. Agradeço especialmente a Luiza, Danilo, Burns, Domo, Ana Sílvia, Camila, Lígia, Mariana, Bau, Martim, Cecília e Faísca. Obrigada pela parceria de sempre! Amo vocês.

As melhores companheiras de república que eu poderia ter tido nos últimos anos! Luiza, Maiara e Juliana. Amo muito vocês e serão sempre a minha família paulistana. Luiza, obrigada por me aguentar morando com você por 8 anos.

As minhas queridas amigas Luiza Stein, Mariana Lage, Marina Noro, Carolina Ernani, Celina Honorio e Laura Sobral pelo apoio de sempre seja nas disciplinas, nas conversas ou nos desabafos. Agradeço também aos meus colegas da pós graduação: Piero, Fabrício, Vadim e Filipe pelo companheirismo. Agradeço a Natália Imada pelos momentos alegres em São Paulo.

Aos meus amigos de Campinas: Ana Helena, Marina Leal, Carolina Pazinato, Jéssica, Laís, Isadora, Rafaela, Guilherme, Rafaella, Simão, Giovanna, Rafael, Ricardo,

Matheus, Igor, Marcelo, Marcella, Patrícia. Agradecimento especial as Rinders, obrigada por me ouvirem e pelos conselhos sempre. Amo muito todos vocês.

Aos meus amigos que conheci fora do país: Rayane Moreira, Pedro Ribeiro e Nick. Mesmo de longe, sempre me dando apoio e carinho.

Ao time maravilhoso que me acolheu com o coração: Tsunami Rugby. Vocês foram essenciais nesses últimos dois anos. Agradeço especialmente a Gaby, Luiza, Damata, Nádia, Pedago, Bau, Flávia, Selinho, Giovanna, Laís e Adriana Moraes.

Aos colegas pela contribuição ao longo deste trabalho: Edward Brambilla (SABESP), Cláudia Lamparelli (CETESB), Hélvio Gregório, Samuel Yang, Renan Ribeiro, Fernando Rodrigues Ferreira, João Paulo Mendes Ferreira e Prof.(a) Dr.(a) Vivian Pellizari.

A atlética ICBIÓ, pelos momentos de descontração, pelas festas e pelo BIFE.

Aos colegas do IO: Ana Paula, Letícia, Daniel e Eder por todos os cafés e conversas compartilhadas. Ao Jorge Gruda, André, Laura, Silvana, Luiz Mariano, Wilson Natal, Fredy, Cláudio e mestre Oziel. A Didi e o Betão da lanchonete. Aos colegas da biblioteca: Wagner, Cidinha e Marta.

A Áurea Ciotti e ao CEBIMAR por permitirem a apresentação deste trabalho em São Sebastião.

A minha grande e calorosa família Birocchi. A todos os meus queridos primos, em especial: Karen, Caroline, Ana Elisa, Letícia, Cristiane, Cintia, Luciana e Fernanda. A Léo e ao meu avô Oswaldo e aos meus tios Sérgio, Terezinha, Sandra, Aloísio, Rita, Mary, Tony, Mauro e Mércia.

A minha querida família Goicochea, tanto no Brasil quanto no Peru: tios e primos, em especial meu avô Antenor, aos meus tios Livia e Marcos e ao meu primo William.

Ao meu melhor amigo, Mauricio. Obrigada por cada momento, pela compreensão e pelo carinho mesmo que as vezes à distância. Eu te amo.

A Suzete e ao Paulo, por me acolherem como se fossem sua filha.

A CAPES pela bolsa de mestrado concedida.

A Deus pelo dom da vida e pela conclusão deste trabalho.

Resumo

A dispersão de coliformes termotolerantes, provenientes dos emissários submarinos de descarte de esgoto doméstico do Araçá, Itaquanduba e Cigarras no canal de São Sebastião, foi simulada através da modelagem numérica em 9 cenários hidrodinâmicos. O objetivo foi determinar se e quais as áreas que são impactadas pelos emissários. O acoplamento entre o modelo de plumas UM3 e o modelo numérico *sECOM* foi realizado. Os emissários submarinos foram a única fonte de efluentes contabilizada, empregando-se um decaimento bacteriano. Os resultados do acoplamento foram qualitativamente comparados com dados de enterococos e coliformes termotolerantes da CETESB e da SABESP. As concentrações de coliformes simuladas não excederam o limite da resolução CONAMA 274 (2000), com exceção de junho de 2013 e 2016, sugerindo que os padrões hidrodinâmicos do canal são suficientes para dispersar o material proveniente dos emissários. As adjacências do emissário do Araçá apresentaram as maiores persistências de coliformes ao longo do tempo. No entanto, as concentrações simuladas não ultrapassaram 1000 NMP/100mL em mais de 0.1% do tempo. No inverno, a persistência e os valores das concentrações de coliformes foram superiores em relação ao verão. O modelo acoplado simulou de forma satisfatória a variabilidade e a dispersão de coliformes termotolerantes na região.

Palavras chave: emissário submarino, canal de São Sebastião, coliformes termotolerantes, poluição marinha, modelagem numérica, correntes, dispersão.

Abstract

The dispersion of thermotolerant coliforms by the Araçá, Itaquanduba and Cigarras submarine sewage disposals, in the São Sebastião channel, has been studied by 9 hydrodynamic numerical model scenarios. The main goal was to determine if and what areas are impacted by the sewage disposal. The UM3 (Visual Plumes) and the numerical model sECOM were coupled. The only sources of pollution introduced were the submarine discharges, using bacteria decay. The coupled model results were qualitatively compared with Enterococos and thermotolerant coliforms data available by sanitary agencies of the São Paulo state (CETESB and SABESP). The modeled coliform concentration did not exceed the limit stated by CONAMA Resolution 274 (2000), with an exception in June 2013 and 2016. It indicates that the hydrodynamic patterns of the channel are sufficient to disperse the material coming from the submarine disposals. Adjacent areas of Araçá submarine sewage disposal presented the highest persistence of coliform concentrations. However, the simulated concentrations did not exceed 1000 NMP / 100mL in more than 0.1 % of the time. In winter, the persistence and values of coliform concentrations were higher in relation to summer. The coupled model simulated satisfactorily the variability and dispersion of coliforms in the region.

Key words: submarine discharge, São Sebastião channel, thermotolerant coliforms, marine pollution, numerical modeling, ocean currents, dispersion.

Lista de Figuras

1	Modelo de emissário submarino na costa. Fonte: CETESB	1
2	Esquema de um emissário submarino. Fonte: Wilkison (1991)	4
3	Esquema de uma pluma do emissário submarino. Fonte: Gonçalves (1997)	5
4	Esquema do campo próximo e campo do efluente estabilizado que dispersará na região do campo afastado. Fonte: Baumgartner et. al (1993)	5
5	Localização do canal de São Sebastião dentro da PCSE.	7
6	Crescimento populacional no período entre 2007 e 2016 no litoral do estado de São Paulo. Fonte: CETESB (2017b).	9
7	Os três emissários submarinos de descarte de esgoto doméstico do CSS (em vermelho) e o emissário do TEBAR (TASSE), de descarte de resíduos de óleo (em cinza) (Fonte: CETESB).	11
8	Fluxograma que resume a metodologia empregada neste trabalho.	16
9	Grade e batimetria utilizada para as simulações hidrodinâmicas do sECOM. A região contornada em preto indica a área de estudo.	25
10	Dados de batimetria e grade utilizadas no sECOM dentro do CSS. Os emissários e o correntógrafo estão indicados: emissário das Cigarras em magenta, emissário de Itaquanduba em azul, emissário do Araçá em vermelho e o correntógrafo em amarelo. As radiais em preto sul, central e norte indicam aonde foram feitas seções verticais de T e S a seguir.	26
11	Condição inicial de temperatura superficial ($^{\circ}\text{C}$) e salinidade para o domínio do modelo sECOM.	27
12	Condição inicial de temperatura superficial ($^{\circ}\text{C}$) e salinidade para o CSS.	28
13	Condição inicial de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) na vertical para as radiais sul, central e norte no CSS (Figura 10)	28
14	Condição inicial de salinidade na vertical para as radiais sul, central e norte no CSS (Figura 10).	28
15	Esquemas propostos por Zhang (1999) para o acoplamento entre os campos próximo e afastado de uma pluma.	31

16	Relação entre a pluma prevista pelo modelo de CP, em forma de esfera (em vermelho), e a grade numérica, em forma cúbica, usada no modelo de CA sECOM.	32
17	Mapa do CSS com a batimetria da região, posição dos emissários submarinos, do fundeio e dos pontos costeiros e de praias monitorados pela CETESB. Os pontos costeiros correspondem às estrelas pretas 1, 2 e 3 na baía de Caraguatatuba e de 1 a 5 no CSS. Os pontos de praias são as estrelas laranjas: 1 indica a praia Preta do Norte, 2 indica a praia de Itaquanduba e 3 indica a praia das Cigarras.	40
18	Dados de bactérias para os três pontos de praia da CETESB e da SABESP: praia de Itaquanduba, praia das Cigarras e praia Preta do Norte que estão indicados por estrelas laranjas na Figura 17, para os cenários 6, 7, 8 e 9 (Tabela 12) de acordo com a numeração na figura.	45
19	Comparação dos totais mensais de chuvas de 2016 e média histórica de 2011 a 2016 para o Litoral Norte (UGRHI 3 em CETESB (2017)). Fonte: Gráfico 6.8 de CETESB (2017).	46
20	Porcentagem semanal de praias classificadas como impróprias pela CETESB em 2016 no Litoral Norte. Fonte: Gráfico 6.7 de CETESB (2017).	46
21	Direção e magnitude médias mensais das correntes de superfície para janeiro (verão) (A) e para julho (inverno) (B) e de fundo para janeiro (C) e julho (D) de 2005.	48
22	Série temporal das componentes paralela e perpendicular à costa de superfície e de fundo para o verão de 2005.	49
23	Série temporal das componentes paralela e perpendicular de superfície e de fundo para o inverno de 2005.	50
24	Diagrama de Taylor para julho 2005 da componente de velocidade paralela à costa na superfície. A esquerda: série temporal do correntógrafo (pontos pretos) e do resultado do modelo (linha azul) para julho de 2005. A direita: diagrama de Taylor comparativo entre o modelo sECOM (<i>model 1</i>) e o dado (<i>reference</i>).	50

25	Séries temporais (a esquerda) e diagrama de Taylor (a direita) da componente de velocidade paralela à costa (V) para os meses de janeiro (verão) e agosto (inverno) de 2013 e 2016 na superfície (5m) e no fundo (15m). Comparações entre o modelo (mod) e dados do ADCP do fundeio no CSS (dado), ambos demonstrados com resolução temporal de 6 horas. Referência indica o desvio padrão igual a 1.0, Vsupv2013, Vsupv2016 indicam V em superfície durante verão (janeiro) de 2013 e 2016, respectivamente, assim como Vsupi2013, Vsupi2016 indicam V em superfície (5 m) durante o inverno (agosto) de 2013 e 2016, respectivamente. O mesmo vale para Vfunv2013, Vfunv2016, Vfuni2013 e Vfuni2016, mas para V de fundo (15 m).	52
26	Esquema 3-D da concentração de CT no instante de tempo final das plumas dos emissários do Araçá, Cigarras e Itaquanduba, nesta ordem, utilizado no cenário 1. As plumas estão se deslocando para sudoeste pois foi usado vento de nordeste para o cenário do UM3 (Visual Plumes).	54
27	Idem a Figura 26 para o cenário 2.	55
28	Idem a Figura 26 para o cenário 3.	55
29	Idem a Figura 26 para o cenário 4.	56
30	Idem a Figura 26 para o cenário 5.	56
31	Esquema 3-D das plumas no instante final do CP para o cenário 6 incluindo dezembro (6.1), janeiro (6.2) e fevereiro (6.3) (de cima para baixo) e emissários do Araçá, Cigarras e Itaquanduba da esquerda para a direita.	58
32	Idem à figura anterior para o cenário 7.	59
33	Idem à figura anterior para o cenário 8.	60
34	Idem à figura anterior para o cenário 9.	62
35	Série temporal da concentração de CT na profundidade de estabilização da pluma dos emissários do Araçá, Itaquanduba e Cigarras (nesta ordem de cima para baixo) para o cenário 1. Esses dados foram usados como condição inicial para o modelo de campo distante, possibilitando assim o acoplamento dos modelos Visual Plumes e sECOM.	64
36	Idem a Figura anterior para o cenário 2.	65
37	Idem a Figura anterior para o cenário 3.	65

38	Idem a Figura anterior para o cenário 4.	66
39	Idem a Figura anterior para o cenário 5.	66
40	Idem a Figura 35 para o cenário 6.	69
41	Idem a Figura 35 para o cenário 7.	70
42	Idem a Figura 35 para o cenário 8.	70
43	Idem a Figura35 para o cenário 9.	71
44	Histograma angular do deslocamento horizontal (em metros) das plumas do Araçá, Itaquanduba e Cigarras (esquerda para direita), nesta ordem , resultante do Visual Plumes para cenários 1, 2, 3, 4 e 5, nesta ordem de cima para baixo. A convenção é para onde a pluma vai. Os números em cada histograma representam a frequência (em porcentagem) do deslocamento horizontal.	74
45	Histograma angular da concentração de CT (em NMP/100mL) das plumas do Araçá, Itaquanduba e Cigarras (esquerda para direita), nesta ordem , resultante do Visual Plumes para cenários 1, 2, 3, 4 e 5, nesta ordem de cima para baixo. A convenção é para onde a pluma vai. Os números em cada histograma representam a frequência (em porcentagem) da concentração de CT (em NMP/100mL).	75
46	Histograma angular do deslocamento horizontal (em metros) das plumas do Araçá, Itaquanduba e Cigarras (esquerda para direita), nesta ordem , resultante do Visual Plumes para cenários 6, 7, 8 e 9, nesta ordem de cima para baixo. A convenção é para onde a pluma vai.	77
47	Histograma angular da concentração de CT (NMP/100mL) das plumas do Araçá, Itaquanduba e Cigarras, nesta ordem , resultante do campo próximo (Visual Plumes) para cenários 6, 7, 8 e 9, nesta ordem. A convenção é para onde a pluma vai.	78
48	Série temporal da concentração normalizada de entre 0 e 1 de CT resultante do modelo (linha contínua em azul) e dos dados (em vermelho) para o ponto de grade da praia Preta do Norte para o cenário 6 (verão 2013) e dados . As cores da figura seguem a legenda da Figura 18.	80
49	Idem a Figura 48 para o cenário 7 (inverno 2013). As cores da figura seguem a legenda da Figura 18.	81

50	Idem a Figura 48 para o cenário 8 (verão 2016). As cores da figura seguem a legenda da Figura 18.	82
51	Idem a Figura 48 para o cenário 9 (inverno 2016). As cores da figura seguem a legenda da Figura 18.	83
52	Série temporal da concentração normalizada de 0 a 1 de CT resultante do modelo (linha contínua em azul) e dos dados (em preto) para o ponto de grade da praia das Cigarras para o cenário 6 (verão 2013). As cores da figura seguem a legenda da Figura 18.	84
53	Idem a Figura 52 para o cenário 7 (inverno 2013). As cores da figura seguem a legenda da Figura 18.	84
54	Idem a Figura 52 para o cenário 8 (verão 2016). As cores da figura seguem a legenda da Figura 18.	85
55	Idem a Figura 52 para o cenário 9 (inverno 2016). As cores da figura seguem a legenda da Figura 18.	86
56	Série temporal da concentração normalizada de 0 a 1 de CT resultante do modelo (linha contínua em azul) e dos dados (em preto) para o ponto de grade da praia de Itaquanduba para o cenário 6 (verão 2013). As cores da figura seguem a legenda da Figura 18.	87
57	Idem a Figura 56 para o cenário 7 (inverno 2013). As cores da figura seguem a legenda da Figura 18.	88
58	Idem a Figura 56 para o cenário 8 (verão 2016). As cores da figura seguem a legenda da Figura 18.	88
59	Idem a Figura 56 para o cenário 9 (inverno 2016). As cores da figura seguem a legenda da Figura 18.	89
60	Correlograma entre as concentrações de CT das simulações do modelo sECOM dos cenários 6, 7, 8 e 9 (cenários reais) e as observações de enterococos da CETESB com correção proposta por Wen et al. (2017) para o ponto de grade da praia Preta do Norte, próxima ao emissário do Araçá. .	91
61	Idem a Figura 60 para o ponto de grade da praia das Cigarras.	92
62	Idem a Figura 60 para o ponto de grade da praia Itaquanduba.	92

- 63 O CSS dividido em 10 setores para a avaliação dos resultados do modelo acoplado. As estrelas indicam os pontos de grade onde os emissários estão localizados e as bolas de cor magenta indicam os pontos monitorados pela CETESB, onde há coleta semanal. As radiais, em amarelo, alinhadas à posição de cada emissário, indicam onde foram realizadas as seções verticais de concentração de CT para o cenário 4. 93
- 64 Painel superior: média geométrica e painel inferior: valores máximos da concentração de CT (NMP/100mL) encontrados para cada setor (legenda) na coluna de água, durante a simulação do cenário 1. Tempo total de 480 horas de simulação ou 20 dias. A legenda indica os 10 setores avaliados (Figura 63). 97
- 65 Painel superior: Vento constante de sudoeste (m.s^{-1}) utilizado no CSS no cenário 2; painel central: média geométrica e painel inferior: valores máximos da concentração de CT (NMP/100mL) encontrados para cada setor (legenda) na coluna de água, durante a simulação do cenário 2. Tempo total de 480 horas de simulação ou 20 dias. A legenda indica os 10 setores avaliados (Figura 63). 98
- 66 Painel superior: Vento constante de nordeste (m.s^{-1}) utilizado no cenário 3 no CSS; painel central: média geométrica e painel inferior: valores máximos da concentração de CT (NMP/100mL) encontrados para cada setor (legenda) na coluna de água, durante a simulação do cenário 3. Tempo total de 480 horas de simulação ou 20 dias. A legenda indica os 10 setores avaliados (Figura 63). 99
- 67 O painel superior apresenta a elevação da superfície do mar (m) ao longo do tempo, o segundo painel, o vento médio (m.s^{-1}) utilizado no CSS, o terceiro, a média geométrica (NMP/100mL) da concentração de CT em cada setor na coluna de água (vide legenda, Figura 63) e, o painel inferior, apresenta os valores máximos da concentração de CT (NMP/100mL) encontrados para cada setor (legenda) na coluna de água, durante a simulação do cenário 4. Tempo total de 480 horas de simulação ou 20 dias. A legenda indica os 10 setores da Figura 63. 101

68	Concentração de CT (NMP/100mL), indicada pela legenda no canto superior esquerdo de cada figura, nos instantes de tempo em 123 h, 171 h, 174 h, 177 h, 192 h e 246 h após o início da simulação do cenário 4. Observa-se a dispersão da pluma de CT pela ação conjunta dos ventos e da forçante termohalina antes, durante e após a passagem de uma frente fria. As cores indicam a dispersão horizontal da concentração de CT (NMP/100mL) integrada na profundidade no CSS.	102
69	Seção vertical para a radial, transversal ao canal, alinhada ao emissário do Araçá (Figura 63) na grade do modelo, localizada próximo a latitude de 23.82°S.	105
70	Seção vertical para a radial, transversal ao canal, alinhada ao emissário de Cigarras (Figura 63), localizada próximo a latitude de 23.74°S.	106
71	Seção vertical para a radial, transversal ao canal, alinhada ao emissário de Itaquanduba, localizada próxima a latitude de 23.80°S.	107
72	O painel superior apresenta a elevação da superfície do mar (m) ao longo do tempo, o segundo painel, o vento médio (m.s^{-1}) utilizado no CSS, o terceiro, a média geométrica (NMP/100mL) da concentração de CT em cada setor na coluna de água (vide legenda, Figura 63) e, o painel inferior, apresenta os valores máximos da concentração de CT (NMP/100mL) encontrados para cada setor (legenda) na coluna de água, durante a simulação do cenário 5. Tempo total de 480 horas de simulação ou 20 dias. A legenda indica os 10 setores da Figura 63.	109
73	O painel superior apresenta a elevação da superfície do mar (m) ao longo do tempo, o segundo painel, o vento médio (m.s^{-1}) utilizado no CSS, o terceiro, a média geométrica (NMP/100mL) da concentração de CT em cada setor na coluna de água (vide legenda, Figura 63) e, o painel inferior, apresenta os valores máximos da concentração de CT (NMP/100mL) encontrados para cada setor (legenda) na coluna de água, durante a simulação do cenário 6. Tempo total de 2160 hs ou 90 dias, pois apresenta sequencialmente os meses (30 dias ou 720 hs) de simulação: dezembro, janeiro e fevereiro. A legenda indica os 10 setores da Figura 63.	111

- 74 O painel superior apresenta a elevação da superfície do mar (m) ao longo do tempo, o segundo painel, o vento médio (m.s^{-1}) utilizado no CSS, o terceiro, a média geométrica (NMP/100mL) da concentração de CT em cada setor na coluna de água (vide legenda, Figura 63) e, o painel inferior, apresenta os valores máximos da concentração de CT (NMP/100mL) encontrados para cada setor (legenda) na coluna de água, durante a simulação do cenário 8. Tempo total de 2160 hs ou 90 dias, pois apresenta sequencialmente os meses (30 dias ou 720 hs) de simulação: dezembro, janeiro e fevereiro. A legenda indica os 10 setores da Figura 63. 113
- 75 O painel superior apresenta a elevação da superfície do mar (m) ao longo do tempo, o segundo painel, o vento médio (m.s^{-1}) utilizado no CSS, o terceiro, a média geométrica (NMP/100mL) da concentração de CT em cada setor na coluna de água (vide legenda, Figura 63) e, o painel inferior, apresenta os valores máximos da concentração de CT (NMP/100mL) encontrados para cada setor (legenda) na coluna de água, durante a simulação do cenário 7. Tempo total de 2160 hs ou 90 dias, pois apresenta sequencialmente os meses (30 dias ou 720 hs) de simulação: junho, julho e agosto. A legenda indica os 10 setores da Figura 63. 116
- 76 O painel superior apresenta a elevação da superfície do mar (m) ao longo do tempo, o segundo painel, o vento médio (m.s^{-1}) utilizado no CSS, o terceiro, a média geométrica (NMP/100mL) da concentração de CT em cada setor na coluna de água (vide legenda, Figura 63) e, o painel inferior, apresenta os valores máximos da concentração de CT (NMP/100mL) encontrados para cada setor (legenda) na coluna de água, durante a simulação do cenário 9. Tempo total de 2160 hs ou 90 dias, pois apresenta sequencialmente os meses (30 dias ou 720 hs) de simulação: junho, julho e agosto. A legenda indica os 10 setores da Figura 63. 117
- 77 Concentração de CT integrada em profundidade (NMP/100mL), indicada pela legenda no canto superior esquerdo de cada figura, nos instantes de tempo em 1911 h, 1926 h, 1929 h, 1932 h, 1947 h e 1983 h após o início da simulação do cenário 9 (inverno de 2016), intervalo no qual houve a passagem de frente fria (do dia 19/08/2016 a 23/08/2016) na região. . . . 119

78	Persistência no tempo de concentrações de CT maiores que 10 NMP/100mL (painéis a esquerda) e 100 NMP/100mL (painéis a direita) para os cenários 1 (painel superior), 2 (painel central) e 3 (painel inferior).	121
79	Persistência no tempo de concentrações de CT maiores que 10 NMP/100mL (painéis a esquerda) e 100 NMP/100mL (painéis a direita) para os cenários 4 (superior) e 5 (inferior).	122
80	Persistência no tempo (%) de concentrações de CT maiores que 10 NMP/100mL (esquerda) e 100 NMP/100mL (direita) para o cenário 6. Painel superior: cenário 6.1 (dezembro de 2012), painel central: cenário 6.2 (janeiro de 2013) e painel inferior: cenário 6.3 (fevereiro de 2013).	124
81	Persistência no tempo de concentrações de CT maiores que 10 NMP/100mL (esquerda) e 100 NMP/100mL (direita) para o cenário 7. Painel superior: cenário 7.1 (junho de 2013), painel central: cenário 7.2 (julho de 2013) e painel inferior: cenário 7.3 (agosto de 2013).	125
82	Persistência no tempo (%) de concentrações de CT maiores que 10 NMP/100mL (esquerda) e 100 NMP/100mL (direita) para o cenário 8. Painel superior: cenário 8.1 (dezembro de 2015), painel central: cenário 8.2 (janeiro de 2016) e painel inferior: cenário 8.3 (fevereiro de 2016).	127
83	Persistência no tempo (%) de concentrações de CT maiores que 10 NMP/100mL (esquerda) e 100 NMP/100mL (direita) para o cenário 9. Painel superior: cenário 9.1 (junho de 2016), painel central: cenário 9.2 (julho de 2016) e painel inferior: cenário 9.3 (agosto de 2016).	129
84	Regiões mais impactadas pelas concentrações de CT providas dos emissários submarinos nas simulações (linha vermelha). As principais praias e localidades na região mais impactada estão pontuadas no mapa em amarelo. Adicionalmente, a persistência de concentrações acima de 10 NMP/100mL para o pior cenário encontrado (agosto de 2016) foi apresentado, para exemplificar a pior situação possível encontrada.	136

Lista de Tabelas

1	Custos típicos comparativos entre dois tipos de tratamento em sistemas de disposição oceânica de esgoto doméstico.	3
2	Crescimento populacional no Litoral Norte do estado de São Paulo no período entre 2007 e 2016.	9
3	Dados de projeto dos emissários submarinos municipais no CSS.	11
4	Classificação dos pontos monitorados na Rede Costeira na baía de Caraguatatuba (3 pontos) e no CSS (5 pontos) e média das áreas de acordo com o IQAC – 2013.	12
5	Classificação dos pontos monitorados na Rede Costeira na baía de Caraguatatuba (3 pontos) e no CSS (5 pontos) e média das áreas de acordo com o IQAC – 2016.	13
6	Médias, valores mínimos e máximos e porcentagem de não conformidades dos resultados de qualidade de água do CSS.	14
7	Médias, valores mínimos e máximos e porcentagem de não conformidades dos resultados de qualidade de água da Baía de Caraguatatuba.	14
8	Componentes de maré consideradas pelo sECOM, com base no TPXO 7.2.	27
9	Cenários para a validação do modelo hidrodinâmico. <i>Sim</i> indica que aquela forçante foi incluída na simulação.	29
10	Limites da concentração de CT estabelecidos pela Resolução CONAMA no 274 de 2000 (Brasil, 2000).	35
11	Cenários idealizados para a modelagem e as respectivas forçantes empregadas. CA = modelo de campo afastado, CP = modelo de campo próximo, S = empregado e X = não empregado na simulação.	37
12	Cenários reais para a modelagem e as respectivas forçantes empregadas. Os cenários são compostos de 3 simulações as quais são referentes aos 3 meses compreendidos em cada cenário. S = empregado e X = não empregado.	37
13	Dados utilizados para a comparação com o modelo.	38

14	Dados semestrais disponibilizados pela CETESB para os anos de 2010 a 2016 de concentração de CT (UFC/100ML) para os 5 pontos de coleta (enumerados de 1 a 5 na tabela) dentro do CSS (Figura 17) para os anos de 2010 a 2016 em profundidades de superfície (S), meio (M) e fundo (F). Valores em vermelho indicam concentração acima do limite CONAMA (Tabela 10).	42
15	Idem à Tabela 14 porém, para os 3 pontos de coleta (enumerados de 1 a 3) na Baía de Caraguatatuba, SP (Figura 17). Note que a estação de fundo no ponto 3 do dia 12/05/2015 não foi realizada.	42
16	Skill entre as observações e os resultados de modelo da componente da velocidade paralela à costa na superfície (VSUP = 5 m de profundidade) e no fundo (VFUN = 15 m de profundidade) para os cenários 6.1 (dezembro 2012), 6.2 (janeiro 2013) e 6.3 (fevereiro 2013); 7.1 (junho 2013), 7.2 (julho 2013) e 7.3 (agosto 2013); 8.1 (dezembro 2015), 8.2 (janeiro 2016) e 8.3 (fevereiro 2016); e 9.1 (junho 2016), 9.2 (julho 2016) e 9.3 (agosto 2016). Nota: d = dias.	51
17	Coeficientes de correlação para janeiro e agosto de 2013 e 2016 entre dados do fundeio e resultados de modelo da componente de velocidade paralela à costa (V) na superfície (5 metros) e no fundo (15 metros), mesmos coeficientes apresentados no Diagrama de Taylor acima.	52
18	Dados iniciais para o modelo de CP para os emissários do Araçá, Cigarras e Itaquanduba. Nota: a vazão e a concentração utilizada são as de projeto dos emissários e foram consideradas constantes ao longo do tempo. . . .	53
19	Concentração mínima, máxima, média geométrica e desvio padrão para a pluma do Araçá calculados para o campo próximo para cada cenário idealizado.	67
20	Idem a Tabela anterior para a pluma de Itaquanduba.	68
21	Idem a Tabela anterior para a pluma de Cigarras.	68
22	Concentração mínima, máxima, média geométrica e desvio padrão para a pluma do Araçá calculados para o campo próximo para cada cenário real.	72
23	Idem a Tabela anterior para a pluma de Itaquanduba.	72
24	Idem a Tabela anterior para a pluma de Cigarras.	72

25	Concentração máxima de CT (100 NMP/100mL) na coluna de água durante toda a simulação, para cada setor, em para cada cenário ideal (1, 2, 3, 4 e 5).	94
26	Concentração máxima de CT (NMP/100mL) na coluna de água durante toda a simulação, para cada setor, para os cenários 6 (verão de 2013) e 8 (verão de 2016).	95
27	Idem à Tabela 26 para os cenários 7 (inverno de 2013) e 8 (inverno de 2016). 95	
28	Desvio padrão da concentração de CT em NMP/100mL encontrada para os setores no CSS para cada cenário idealizado (1, 2, 3, 4 e 5).	96
29	Desvio padrão da concentração de CT em NMP/100mL encontrada para os setores no CSS em cada simulação durante o verão de 2013 e de 2016 (cenários 6 e 8, respectivamente).	96
30	Idem à Tabela 29 para as simulações de inverno de 2013 e de 2016 (cenários 7 e 9, respectivamente).	96
31	Persistência no tempo (%) máxima para as concentrações de CT que foram maiores que 10 NMP/100mL para os setores em estudo para os cenários idealizados.	122
32	Persistência no tempo (%) máxima para as concentrações de CT que foram maiores que 100 NMP/100mL para os setores em estudo para os cenários idealizados.	123
33	Persistência no tempo (%) máxima para as concentrações de CT que foram maiores que 10 NMP/100mL para os setores em estudo para os cenários reais.	130
34	Persistência no tempo (%) máxima para as concentrações de CT que foram maiores que 100 NMP/100mL para os setores em estudo para os cenários reais.	130
35	Persistência da pluma no tempo (%) máxima para concentrações de CT maiores que 10 NMP/100mL para 6 pontos de estudo: praia Preta do Norte, emissário submarino (ES) do Araçá, praia das Cigarras, ES das Cigarras, praia de Itaquanduba e ES de Itaquanduba. Nota: C = cenários. .	132

36	Persistência no tempo (%) máxima para concentrações de CT que foram maiores que 100 NMP/100mL para 6 pontos em estudo: praia Preta do Norte, emissário submarino (ES) do Araçá, praia das Cigarras, ES das Cigarras, praia de Itaquanduba e ES de Itaquanduba. Nota: C = cenários.	133
37	Os locais e os cenários onde houve persistência no tempo (%), de concentrações de CT superiores a 1000 NMP/100mL no modelo. Setor 2a está indicado na Figura 63 e ES Araçá indica ponto do emissário submarino do Araçá no modelo (Figura 17).	134
38	Regiões (ou setores) mais atingidas(os) pela dispersão de concentrações de CT do modelo e locais importantes que estão presentes nos respectivos setores.	135

Introdução

A poluição marinha

A grande densidade demográfica nas regiões costeiras torna a poluição marinha bastante recorrente, principalmente por esgoto industrial e doméstico das atividades humanas, sejam esses tratados ou não tratados. As fontes de esgoto doméstico não tratado são aquelas que não estão conectadas à rede de tratamento de esgoto em terra. O descarte de esgoto doméstico sem um tratamento prévio polui o meio ambiente. Os oceanos são, infelizmente, o destino final desse material, principalmente pela ação das chuvas. Todo o esgoto que não é conectado a rede de saneamento é levado pela chuva diretamente até os rios e os córregos, que desembocam em praias e regiões costeiras. Já as fontes de esgoto doméstico tratado que chega no mar são principalmente originárias do tratamento de esgoto doméstico em terra e, posteriormente, os resíduos do tratamento são lançados aos oceanos através de emissários submarinos (Figura 1).

Figura 1: Modelo de emissário submarino na costa. Fonte: CETESB

Emissários submarinos

O emissário submarino faz parte do sistema de disposição oceânica de esgoto que consiste em uma canalização que transporta os efluentes desde uma ETE (Estação de Tratamento de Esgoto) ou uma EPC (Estação de Pré-Condicionamento) até seu destino final. É constituído de uma parte terrestre e outra oceânica ficando, esta última, assentada no assoalho marinho onde é ancorada. O comprimento do emissário, ou a distância de lançamento dos despejos, depende do nível de condicionamento prévio dado ao esgoto,

da profundidade de lançamento e do regime de correntes marinhas, o qual é determinado pelas seguintes forçantes: rios, marés, clima de ondas e regime de ventos (Souza et al. 2007).

A Resolução No 430, de 13 de maio de 2011, dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357 de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA): *Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente nos corpos receptores após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos nesta Resolução e em outras normas aplicáveis.*

Os emissários submarinos são amplamente utilizados em todo o mundo como uma forma de destinação final de efluentes urbanos, principalmente devido ao baixo custo comparativamente a outras formas de tratamento (Lamparelli et al. 2016).

Ludwig et al. (1988) apresentaram um estudo comparativo de custos entre três sistemas que combinam diferentes níveis de condicionamento prévio (tratamento) com a disposição por emissários submarinos. Os sistemas propostos pelos autores consistem em:

1. Tratamento Secundário: incluindo sedimentação primária, tratamento biológico por lodo ativado, sedimentação secundária, digestão do lodo dos sedimentadores, disposição do lodo tratado e cloração;
2. Tratamento Primário: incluindo tanques de sedimentação e tratamento do lodo sedimentado em digestores;
3. Tratamento Preliminar: triagem do efluente através de milipeneiras.

Os três sistemas podem incluir emissários submarinos para a disposição final do efluente tratado, cujo custo é avaliado na Tabela 1 (Roberts, Philip 2016). O autor considerou os custos de construção, operação e manutenção (*O&M*) e o custo total acumulado depois de 25 anos de operação. Roberts, Philip (2016) apresentou com precisão os custos relativos envolvidos nas alternativas de tratamento preliminar e secundária. As condições que diminuem os custos da implantação de um emissário são: a facilidade de execução e a instalação em áreas protegidas (mar calmo) e de pouca profundidade. Os custos podem ser mais altos se a instalação for feita em mar agitado com ondas muito fortes e se

a execução do túnel for feita sob a zona de arrebentação. Além disso, o sistema de tratamento de disposição oceânica com menor custo é o preliminar (Tabela 1). Esse tipo de tratamento é considerado suficiente e eficaz (Roberts, Philip 2016), desde que o emissário submarino conectado ao final desse sistema possua comprimento e diâmetro adequados para uma rápida diluição e dispersão vertical e horizontal no oceano. Dessa forma, um sistema inicialmente bem planejado e monitorado, dispensa o uso de um tratamento superior (primário ou secundário), o qual envolve custos muito mais elevados do que um tratamento preliminar (Roberts et al. 2017; Roberts, Philip 2016).

Tabela 1: Custos típicos comparativos entre dois tipos de tratamento em sistemas de disposição oceânica de esgoto doméstico.

Localização	Nível de tratamento	Custos (milhões de dólares)			
		Construção		O&M (por ano)	Custo total (em 25 anos)
		Emissário	Estação de pré-condicionamento (EPC)		
Taboada, Lima Peru	Preliminar	90	60	4	250
	Secundário	50	400	18	900
Cartagena, Colômbia	Preliminar	22	12	0.7	52
	Secundário	22	150	13	97

Fonte: Roberts, 2016.

Na porção final do emissário submarino são dispostos vários bocais ou orifícios que constituem a chamada tubulação difusora, através da qual o efluente é lançado nas águas marinhas (Figura 1). Cada orifício difusor forma um jato efluente (Figura 2) com quantidade de movimento muito maior, e densidade significativamente menor, que a corrente marinha circunvizinha.

As vantagens dos emissários submarinos são: menor custo operacional, menor risco ambiental e de saúde pública se houver problemas operacionais, maior confiabilidade operacional, menor geração de resíduos sólidos e de odor e menor área requerida. Existem desvantagens como: maior impacto no ambiente bentônico, não permite a alternativa do reuso, menor aceitabilidade pública.

O descarte de dejetos no oceano, seja em águas rasas ou profundas, pode causar diversos impactos se a concentração desses dejetos ultrapassar os limites estabelecidos pelos órgãos ambientais competentes. Dentre esses impactos, a poluição das praias e regiões litorâneas pode prejudicar a economia local como por exemplo as atividades recreacionais e o turismo da região, além de afetar a pesca, causando prejuízos aos pescadores

artesaniais e industriais. Além disso, podem gerar problemas de saúde pública através de doenças transmitidas por organismos patogênicos e poluentes na água do mar. De forma a evitar esses impactos, o material transportado pelos emissários submarinos deve ser tratado corretamente antes do descarte, removendo possíveis contaminantes.

No Brasil, existem 17 emissários submarinos de esgoto doméstico, sendo a maioria deles localizados no estado de São Paulo. Atualmente, existem 8 sistemas de disposição oceânica ativos através de emissários submarinos no litoral paulista: 3 na Praia Grande, 1 em Santos, 1 no Guarujá e 3 no canal de São Sebastião. Adicionalmente, existe um pequeno emissário submarino sem sistema de tratamento prévio ao descarte na praia da Enseada em Ubatuba. Cinco de quinze municípios litorâneos do estado de São Paulo possuem sistema de descarte oceânico no tratamento sanitário (Lamparelli et al. 2016).

Figura 2: Esquema de um emissário submarino. Fonte: Wilkison (1991)

Processos de mistura

A hidrodinâmica de um efluente que é continuamente descartado em um corpo de água pode ser estudada como um processo de mistura que ocorre em duas regiões separadas (Bleninger e Jirka 2004). Quando o esgoto doméstico é descartado nos oceanos através das portas (ou saídas) dos difusores de um emissário, ocorre o processo de mistura devido à turbulência gerada pelo movimento e empuxo do efluente. Essa região é chamada de campo próximo (CP) ou zona de mistura inicial. Quando a pluma do efluente atinge a sua profundidade de estabilização (ou *trap height*, em inglês) ela pára de subir em direção à superfície do mar e começa a se espalhar lateralmente. Este campo espalhado de efluente é chamado de campo de efluente estabilizado (Figura 3). Em sequência, o campo de esgoto estabilizado (Figura 4) pode ser transportado pelas correntes oceânicas

e sofre difusão por turbulência oceânica na região chamada de campo afastado (CA) (Zhang 1995).

Figura 3: Esquema de uma pluma do emissário submarino. Fonte: Gonçalves (1997)

Figura 4: Esquema do campo próximo e campo do efluente estabilizado que dispersará na região do campo afastado. Fonte: Baumgartner et. al (1993)

A dispersão de plumas de contaminantes dispostas no ambiente aquático através de emissários submarinos é usualmente modelada separando-se o CP do CA. O CP gera as características geométricas da pluma fornecendo diâmetro, deslocamento horizontal e profundidade de estabilização da pluma. Para gerá-lo, é necessário conhecer as caracterís-

ticas hidrodinâmicas da região em que a pluma se encontra como temperatura, salinidade e velocidades zonal e meridional das correntes. O CP pode ser gerado através de diversos modelos de plumas como *Visual Plumes*, *CORMIX*, *NRFIELD* e *UM3*. O CA geralmente é modelado através de modelos hidrodinâmicos que sejam capazes de simular a qualidade de água. O campo de velocidades deve ser obtido de um cálculo numérico da equação do movimento (modelo de circulação) ou de observações diretas e ocasionalmente de um modelo de escala física. Um modelo tri-dimensional é necessário quando as correntes oceânicas horizontais mudam significativamente na direção da profundidade. Essa variação é gerada principalmente pela ação do vento, do atrito com o fundo, topografia do fundo, diferenças de densidade ou pela força de Coriolis. Uma série de códigos de domínios públicos ou privados estão disponíveis atualmente para prever a descarga de efluentes.

Área de estudo

O canal de São Sebastião (CSS) está situado na região central da Plataforma Continental Sudeste Brasileira (PCSE), que é denominada como Embaiamento de São Paulo (Zembruski 1979). A PCSE é a parte mais rasa e mais costeira da margem continental onde são encontradas profundidades entre 0 e 200 m (Morais 2016). A PCSE possui comprimento aproximado de 1000 km e é delimitada por Cabo Frio e pelo Cabo de Santa Marta, cuja parte mais larga, de aproximadamente 230 km, está localizada em frente a Santos e as mais estreitas, nas proximidades de Cabo Frio, com 50 km, e Cabo de Santa Marta, com 70 km (Silva et al. 2005). A zona costeira da PCSE possui regiões particularmente vulneráveis do ponto de vista ambiental devido às atividades humanas como, por exemplo, as atividades portuárias e o turismo. Atualmente, o estudo do CSS é de amplo interesse, nas mais diversas áreas do conhecimento, devido à possível ampliação do porto de São Sebastião (Turra et al. 2017) no futuro próximo.

De acordo com Castro (1990), os ventos típicos que sopram no CSS de nordeste possuem intensidade média de 4.2 m.s^{-1} . A estrutura termohalina da PCSE é composta por três massas de água (Castro et al. 1987; Castro e Miranda 1998): a Água Tropical (AT), a Água Central do Atlântico Sul (ACAS) e a Água Costeira (AC). A AT predomina a superfície da PCSE (Silva et al. 2005) com temperaturas maiores que 20° e salinidades maiores que 36 (Emilsson 1961). A ACAS é presente em camadas mais profundas, con-

tribuindo com mais de 50% do volume de água total da PCSE para a formação de massas de água a leste do CSS (Miranda 1982). Essa massa d'água é relativamente fria, com temperaturas menores que 20° e salinidades menores que 36,4 (Silva et al. 2005). A AC é uma mistura de águas continentais com as águas da plataforma continental e domina a região costeira, tendo as menores salinidades dentre as 3 massas de água (Morais 2016).

O CSS localiza-se no estado de São Paulo entre a Ilha de São Sebastião e o continente em 23°S (Figura 5). A teoria aceita para a formação do canal é de origem tectônica pelo deslizamento de parte do continente em direção ao oceano (Kvinge 1967). O centro do canal possui largura de 1.9 km, enquanto suas entradas, apontadas para nordeste e outra para sudoeste, possuem 5.6 km e 7.2 km de largura, respectivamente (Castro 1990). O canal tem formato de meia lua, comprimento de quase 22 km (Castro e Miranda 1998) e topografia irregular. Além disso, é caracterizado por um aumento abrupto da profundidade nas margens, com profundidades maiores que 20 m ao longo do eixo longitudinal (Castro 1990). Existe um canal principal mais profundo próximo a ilha com profundidade de 25 m ao sul do canal e profundidade máxima de 45 m no centro do canal (Castro e Miranda 1998) e que ocupa todo o comprimento do canal (Kvinge 1967).

Figura 5: Localização do canal de São Sebastião dentro da PCSE.

É importante observar a singularidade do CSS na costa brasileira pela sua posição e tendo em vista que não se trata de um canal estuarino, o que faz do mesmo um canal com características físicas únicas (Silva et al. 2005). O CSS é caracterizado por processos

físicos complexos, incluindo fortes correntes geradas pelo vento, mistura de águas de origens e características variadas e uma termoclina sazonal bem definida que é acompanhada por uma estrutura baroclínica de duas camadas (Castro e Miranda 1998). As principais forçantes dos movimentos no canal são a tensão de cisalhamento do vento sinótico e forças termohalinas, sendo as correntes do canal pouco influenciadas pelas marés (Kvinge 1967; Castro 1990; Dottori et al. 2015).

Durante períodos de vento favoráveis ao afloramento costeiro de águas mais profundas, especialmente nas estações de verão e primavera, Coelho (1997) mostrou, através de experimentos numéricos, que a intrusão da ACAS pode chegar ao CSS. Lohrenz and Castro (2004) mostraram que a ACAS, que propaga-se do talude em direção à costa pelo fundo da PCSE durante o verão e a primavera, flui através da entrada sul do CSS, formando uma aguda termoclina. Dottori et al. (2015) mostraram que a chegada da ACAS no CSS causa mudanças na temperatura e salinidade do canal também próximo à superfície. Além disso, Dottori et al. (2015) também evidenciaram que as correntes próximas à Baía do Araçá, dentro do CSS, são dominadas pelo modo barotrópico. As escalas temporais predominantes para a variabilidade dos processos físicos no CSS são a sazonal e a subinercial. A primeira predomina nas intrusões da ACAS e a segunda, na variabilidade sinótica dos ventos (Dottori et al. 2015).

O CSS (Figura 5) apresenta grande importância econômica, turística e ecológica para o Estado de São Paulo. Assim, o conhecimento da hidrodinâmica e dos processos físicos que ocorrem no local é importante para uma coordenação harmoniosa das atividades econômicas, sociais e turísticas com o meio ambiente, amenizando possíveis impactos ambientais.

Poluição e emissários na região

Podemos observar que o litoral norte paulista é uma das regiões que mais cresce no estado, alcançando um crescimento populacional de 37% em Ilhabela e de 30% em São Sebastião, sendo a média para o estado de São Paulo em 12% entre 2007 e 2016 (Figura 6). Com o grande aumento populacional nesta região (Tabela 2), fica evidente a importância de estudar os impactos ambientais associados, especialmente em relação à poluição marinha. No CSS existem 4 emissários submarinos, sendo 3 de descarte de esgoto doméstico e 1 de descarte de resíduos de óleo.

Figura 6: Crescimento populacional no período entre 2007 e 2016 no litoral do estado de São Paulo. Fonte: CETESB (2017b).

Tabela 2: Crescimento populacional no Litoral Norte do estado de São Paulo no período entre 2007 e 2016.

	Município	Estimativa Populacional		Aumento Absoluto (nº habitantes)	Crescimento no período
		2007	2016		
Litoral Norte	Ubatuba	75.008	87.364	12.356	16%
	Caraguatatuba	88.815	115.071	26.256	30%
	São Sebastião	67.348	84.294	16.946	25%
	Ilhabela	23.886	32.782	8.896	37%

Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)

O emissário submarino de descarte de resíduos de óleo é localizado no Terminal Marítimo Almirante Barroso (TEBAR), na parte central do CSS, sendo o maior terminal aquaviário da América do Sul. Porém, nesse trabalho, o efeito do TEBAR não será estudado. Os emissários de descarte doméstico localizam-se na baía do Araçá e na praia das Cigarras, no lado continental do canal, na cidade de São Sebastião, e em Itaquanduba, localizado em Ilhabela (Figura 7). No CSS, cada um desses emissários domésticos está conectado a uma EPC onde há o pré-condicionamento do esgoto, também chamado de tratamento preliminar, de acordo com a classificação de Ludwig et al. (1988).

Os emissários domésticos atendem às populações locais e seus dados de projeto estão apresentados na Tabela 3. Dessa tabela consta apenas a população local, desconsiderando as populações flutuantes significativas durante a temporada de verão. Durante esse período, a população de Ilhabela, por exemplo, chega a ser o triplo da população local, que é 32.197 habitantes (IBGE 2010). Durante o verão, mais de 650 mil pessoas frequentam o litoral norte de São Paulo (CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO

ESTADO DE SÃO PAULO 2016b). Dada essa densa ocupação da região com grande reflexo no uso das águas, é importante compreender como o material desses emissários impacta a balneabilidade de suas águas.

O sistema de disposição oceânica de São Sebastião, próximo ao Araçá, é conectado a EPC Itatinga e está em operação há 27 anos. A baía do Araçá, localizada no lado continental central do canal, é uma enseada artificial formada durante a construção do porto de São Sebastião. Essa baía apresenta profundidades máximas de 10 m em sua desembocadura e, em direção ao continente, torna-se mais estreita e rasa. Ainda, possui pouca declividade e aproximadamente metade de sua área fica descoberta durante a maré baixa, sendo um dos poucos ambientes dominados pela maré ao longo da costa sudeste do Brasil (Siegle, Eduardo e Dottori, Marcelo and Villamarin, Bárbara C. 2017). As marés variam entre + 2,06 m (máximo) e - 0,04 m (mínimo) (Brasil Lima 1998). O emissário da baía do Araçá é constituído de duas partes, uma terrestre e outra submarina. O trecho terrestre começa na Estação de Pré-Condicionamento de Esgoto (EPC) e vai até a câmara de carga, na praia do Topo. O esgoto que chega na EPC passa por uma caixa de areia e seis peneiras estáticas e, posteriormente, é clorado para desinfecção. O efluente da EPC é encaminhado por recalque até a chaminé de equilíbrio por emissário terrestre de ferro fundido com extensão de 5.182 m e 0,50 m de diâmetro. A chaminé de equilíbrio funciona como divisória, entre o trecho da tubulação que é recalçada (bombeada) e o trecho que o efluente é encaminhado para o emissário submarino por gravidade. No primeiro semestre de 2014 o trecho compreendido pelo Emissário Submarino sofreu intervenções. Deste modo, a estrutura submarina anterior de 1045 m foi prolongada em 155 metros, ficando com 1200 m de comprimento fundeados numa profundidade de 17 metros.

O sistema de disposição oceânica de Cigarras localiza-se na parte norte ao lado continental do canal, na praia de Cigarras. Em 1985 foram detectados problemas no funcionamento deste emissário e, em 1994, um novo emissário foi instalado, com capacidade de atender 1600 pessoas. Esse emissário está localizado em uma profundidade de 8.5 m. O sistema da EPC Cigarras possui um sistema de gradeamento médio, onde o esgoto gerado é levado ao aterro municipal, com limpeza semanal das grades. O efluente ainda recebe cloração, antes de ser encaminhado para o emissário submarino de Cigarras de 1068 m de comprimento.

O sistema de disposição oceânica de Itaquanduba localiza-se no Bairro Itaquan-

duba, no município de Ilhabela. É composto de uma EPC e um emissário submarino o qual é formado por duas partes, terrestre e submarina. O esgoto doméstico que chega a EPC é tratado de acordo com os seguintes passos: 1. peneiras de seção trapezoidal, rotativas inclinadas, de limpeza automática, com abertura de 1 mm e sistema de lavagem, compactação e “ensacamento” dos sólidos removidos; 2. desarenadores do tipo canal, com remoção mecanizada, com lavagem e “ensacamento” da areia, e 3. desinfecção por cloração, com o uso de hipoclorito de sódio. Parte do emissário está localizada no canal de navegação, atingindo profundidades superiores a 30 m e com comprimento total de 800 m.

Figura 7: Os três emissários submarinos de descarte de esgoto doméstico do CSS (em vermelho) e o emissário do TEBAR (TASSE), de descarte de resíduos de óleo (em cinza) (Fonte: CETESB).

Tabela 3: Dados de projeto dos emissários submarinos municipais no CSS.

Local	Itaquanduba	Ponta da Cigarras	Ponta do Araçá
População máxima	26.000	1.600	21.396
Vazão máx ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.15	0.012	0.14
Comprimento (m)	800	1.068	1.200
Profundidade (m)	37	8	17
Diâmetro (m)	0.4	0.16	0.4
Tubo difusor (m)	30	3.5	25
Nº de orifícios	8	7	6
Início da Operação	2010	1985	1991

Adaptado de CETESB (2007a).

Assim, o presente trabalho pretende, através da análise das simulações de diversos cenários, estudar quais são os locais mais afetados pela descarga de esgoto doméstico

dos emissários submarinos no Araçá, Cigarras e Itaquanduba. Ao contrário de trabalhos pretéritos, esse trabalho engloba o estudo conjunto dos 3 emissários submarinos presentes no CSS.

Motivação

Qualitativamente, os resultados desse trabalho podem apontar as regiões de maior risco, ou seja, aquelas de menor dinâmica, onde ocorreram acúmulo dos CT no CSS, assim como realizado em Soares (1994), porém de uma maneira mais realista. Comparando-se as Tabelas 4 e 5, podemos notar que o Índice da Qualidade de Águas Costeiras (IQAC), utilizado pela CETESB, declinou de 2013 para 2016 para os pontos costeiros monitorados do CSS, o que significa uma piora da qualidade de água. O declínio no IQAC foi, em média, de 8 pontos (caindo de um IQAC de 98 em 2013 para IQAC de 92 em 2016). Já para a baía de Caraguatatuba podemos observar uma melhora neste índice de 2013 para 2016, não acompanhando portanto o declínio observado para o CSS. A piora na qualidade de água no CSS é uma das motivações desse trabalho.

Tabela 4: Classificação dos pontos monitorados na Rede Costeira na baía de Caraguatatuba (3 pontos) e no CSS (5 pontos) e média das áreas de acordo com o IQAC – 2013.

Classificação - IQAC 2013					(%) de amostras não conformes por Parâmetro
Local de amostragem	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média	
Baía de Caraguatatuba	99	92	99	97	Clorofila <i>a</i> (17%), Boro* (11%)
Canal de São Sebastião (5pts)	99	99	99	98	Clorofila <i>a</i> (10%)
	93	99			

* parâmetros que não fizeram parte da composição do IQAC, mas apresentam não conformidade

Legenda:	Ótima	Bom	Regular	Ruim	Péssima
	≥ 95	< 95 e ≥ 80	< 80 e ≥ 65	< 65 e ≥ 45	< 45

Fonte: CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (2014a)

Tabela 5: Classificação dos pontos monitorados na Rede Costeira na baía de Caraguatatuba (3 pontos) e no CSS (5 pontos) e média das áreas de acordo com o IQAC – 2016.

Classificação - IQAC 2016					Porcentagem de não conformidades por parâmetro
Local de amostragem	Ponto			Média	
	1	2	3		
Baía de Caraguatatuba	99	99	99	99	clorofila <i>a</i> (8%)
Canal de São Sebastião (5pts)	87	99	85	92	oxigênio dissolvido (7%), enterococos (3%). *coliformes termotolerantes (3%)
	90	99			

* parâmetros que não fizeram parte da composição do IQAC, mas apresentam não conformidade

Legenda:

Ótima	Boa	Regular	Ruim	Péssima
≥ 95	< 95 e ≥ 80	< 80 e ≥ 65	< 65 e ≥ 45	< 45

Fonte: CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (2017b)

Através da observação dos parâmetros físicos no CSS, nota-se uma queda generalizada na qualidade da água na região em 2016 comparativamente aos 5 anos anteriores (2011 a 2015), conforme pode ser visto pela Tabela 6. As amostras coletadas em 2016 nos cinco pontos do CSS indicaram não conformidades nos resultados de oxigênio dissolvido e enterococos (Tabela 5). Comparando-se com o ano anterior, houve queda na qualidade e as concentrações de coliformes termotolerantes (CT) e os enterococos ultrapassaram os limites do padrão de qualidade ambiental em 3% do tempo. As concentrações de clorofila-a foram similares nas duas campanhas, resultando em classificações que variaram de oligotrófica (pobre em nutrientes) a mesotrófica (moderado enriquecimento em nutrientes), com a média para ambas as campanhas indicando a condição mesotrófica (CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO 2017b). Pela média anual, para os cinco pontos monitorados, essa região mostra um ambiente em processo de eutrofização classificado como mesotrófico (CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO 2017b), mantendo a classificação trófica em relação ao ano de 2015.

Comparando as Tabelas 6 e 7, podemos observar que o CSS estava sujeito a maiores concentrações de CT em relação à baía de Caraguatatuba, sendo este um outro motivo para escolher o CSS como a região de estudo. No ano de 2016 o CSS apresentou médias de CT e enterococos em 38,03 UFC/100mL e 29,57 UFC/100mL, respectivamente, valores bastante superiores à média entre 2011 e 2015 de 4,47 UFC/100mL e 1,67 UFC/100mL, respectivamente (Tabela 6). Já a baía de Caraguatatuba apresentou médias

para 2016 em 1,22 UFC/100mL para CT e 3 UFC/100mL para enterococos (Tabela 7).

Além disso, observa-se que a região sofre de baixo tratamento de esgoto doméstico o que pode afetar a qualidade de água na região. A coleta de esgoto em São Sebastião e Ilhabela corresponde a 30% e 28%, respectivamente, do total de esgoto produzido nas cidades. O tratamento do esgoto é de 55% e 4%, respectivamente, mostrando que o saneamento básico na área de estudo ainda precisa ser aperfeiçoado.

Assim, o seu grande uso para o lazer, para as atividades econômicas e a sua alta densidade demográfica, tornam o canal de São Sebastião um local interessante a ser estudado do ponto de vista oceanográfico.

Tabela 6: Médias, valores mínimos e máximos e porcentagem de não conformidades dos resultados de qualidade de água do CSS.

Parâmetro	Unidade	Padrão classe 1 águas salinas Res. CONAMA nº 357/05	mín	máx	% NC	Média aritmética - 2016	Média aritmética - 2011-2015
Microbiológicos							
Coliformes Termotolerantes	UFC/100mL	1000	1	1040	3%	38,03	4,47
Enterococos	UFC/100mL	100	1	660	3%	29,57	1,67

Fonte: Relatório de Águas Costeiras 2016 (CETESB, 2017).

Tabela 7: Médias, valores mínimos e máximos e porcentagem de não conformidades dos resultados de qualidade de água da Baía de Caraguatatuba.

Parâmetro	Unidade	Padrão classe 1 águas salinas Res. CONAMA nº 357/05	mín	máx	% NC	Média aritmética - 2016	Média aritmética - 2011-2015
Microbiológicos							
Coliformes Termotolerantes	UFC/100mL	1000	1	5	0%	1,22	5,87
Enterococos	UFC/100mL	100	1	11	0%	3,00	1,40

Fonte: Relatório de Águas Costeiras 2016 (CETESB, 2017)

Hipótese

A hipótese científica desse trabalho é que os efluentes domésticos dos emissários submarinos presentes no CSS podem impactar áreas costeiras adjacentes, dependendo da situação hidrodinâmica presente.

Objetivos

O principal objetivo desse trabalho é determinar as áreas que são afetadas negativamente pelos efluentes domésticos liberados pelos emissários submarinos do CSS. Esperamos detectar as áreas adjacentes impactadas negativamente pelo material lançado por emissários submarinos no CSS. Em termos práticos, obteremos, ao final do trabalho mapas e gráficos da distribuição de CT no domínio do CSS. A partir de diferentes simulações numéricas, pretendemos mostrar como a qualidade da água pode ou não ser prejudicada devido à presença dos emissários submarinos, em diferentes cenários hidrodinâmicos.

Os objetivos específicos são:

- Implementar o módulo de qualidade de água disponível no modelo sECOM na região;
- Utilizar o modelo hidrodinâmico na região para obter as correntes geradas pelo vento sinótico e por gradientes de densidade;
- Determinar quais são as condições forçantes mais susceptíveis para que as áreas adjacentes sejam afetadas negativamente pela presença de CT provindos dos emissários no CSS;
- Determinar as áreas adjacentes mais atingidas por CT originários dos emissários no CSS.

Material e Métodos

A metodologia escolhida é a modelagem numérica através do acoplamento dos módulos hidrodinâmicos e de qualidade de água (ou de traçador de patógenos) do *sECOM* (*Stevens Institute Estuarine and Coastal Ocean Model*) (Blumberg e Mellor 1987) com o modelo UM3 do modelo Visual Plumes (Frick et al. 2003). O acoplamento será descrito nas seções a seguir. Ele será utilizado para estudar a distribuição, dispersão e destino dos CT na região do CSS.

A metodologia proposta é resumidamente disposta no fluxograma da Figura 8.

Figura 8: Fluxograma que resume a metodologia empregada neste trabalho.

A metodologia deste trabalho está basicamente dividida em duas grandes Seções: 1) modelagem e 2) métodos usados para interpretação dos resultados do modelo. Para a Seção 1, primeiramente, nós validamos a componente paralela à costa (V) do modelo hidrodinâmico *sECOM* para avaliar se o modelo representava, de forma razoável, a realidade hidrodinâmica no CSS. Depois disso, o *sECOM* foi empregado em cada cenário descrito nas Tabelas para obter os campos de densidade e de correntes como condição inicial das simulações do campo próximo no programa Visual Plumes. Esse, por sua vez, gerou como resultado final os valores da concentração, do diâmetro e do deslocamento

das três plumas correspondentes aos três emissários submarinos estudados. Esses resultados foram utilizados como condição inicial para o modelo sECOM com o módulo de bactérias ativado para assim, gerar a dispersão das plumas dos emissários utilizando como traçador os CT. Todo este procedimento está então dividido da seguinte forma: *i.* modelo hidrodinâmico sECOM, *ii.* modelo de campo próximo (Visual Plumes), *iii.* acoplamento do campo próximo com o campo afastado e *iv.* modelo de campo afastado e o módulo de bactérias. Posteriormente, para a Seção 2, os métodos empregados para interpretação de resultados do modelo são apresentadas da seguinte forma: *i.* validação qualitativa do módulo de dispersão bacteriana, *ii* divisão do CSS em setores e *iii.* persistência no tempo no CSS.

Modelagem

O principal modelo utilizado nesse trabalho foi o *sECOM* pois o maior interesse está na advecção e difusão turbulenta ou seja, nas regiões afastadas do local de descarte pelos emissários submarinos. O *sECOM* é um modelo tri-dimensional, hidrodinâmico, de ondas e de transporte de sedimentos que foi criado pelo *Stevens Institute of Technology*. O modelo é designado para simular distribuições de nível da água, correntes, temperatura, salinidade, traçadores, sedimentos coesivos e não-coesivos e ondas em sistemas marinhos e de água doce que sejam dependentes do tempo, com o maior realismo possível. Neste trabalho, desconsideramos os efeitos de ondas e sedimento e para a circulação, utilizamos apenas o módulo hidrodinâmico e o módulo de qualidade de água chamado também de trajetória de traçadores ou de patógenos.

O modelo hidrodinâmico sECOM

O *sECOM*, também nomeado como *Urban POM*, teve a sua origem na metade da década de 80 com a criação do *Princeton Ocean Model (POM)* (Blumberg e Mellor 1987). Desde essa ocasião, o modelo já foi definido como tridimensional e costeiro e incorporava um fechamento turbulento para providenciar uma parametrização realística dos processos de mistura verticais. Blumberg e Mellor (1987) mostraram algumas utilidades deste modelo, descrevendo experimentos numéricos que envolviam ressurgência costeira e Ondas Confinadas da Costa (OCC) ou *Coastal Trapped Waves*. No entanto, de acordo com Blumberg et al. (1996), os rápidos processos de pequena escala de mistura de plumas

não são bem representados em modelo hidrodinâmicos ou de campo afastado.

No sistema de coordenadas verticais *sigma* (σ), o modelo resolve as equações da continuidade e do movimento sob a condição de pressão hidrostática (Blumberg 2010). O sistema de coordenadas *sigma* possui a melhor configuração para irregularidades batimétricas, sendo:

$$\sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta}, \quad (1)$$

onde H é a profundidade total da coluna d'água, η é elevação do nível do mar e z é a coordenada cartesiana vertical. Assim, na Equação 1, os níveis sigma representam porcentagens da coluna de água total ($H + \eta$).

Os experimentos numéricos envolvem o uso do modelo de circulação em dois modos: prognóstico e diagnóstico. No modo prognóstico as equações do movimento, assim como as equações que regem as distribuições de T e S , são integradas como um problema de valor inicial. Estes experimentos de previsão nem sempre alcançam o modo estacionário já que o tempo de resposta oceânica para o campo de densidade pode ser considerável (Blumberg e Mellor 1987). No modo diagnóstico, a distribuição de densidade observada é especificada para todos os pontos da grade e mantida ao longo do tempo. Utilizamos o modo prognóstico no nosso modelo para prever as condições hidrodinâmicas ao longo do tempo.

O POM foi primeiramente adaptado para ambientes de águas rasas como baías, estuários, lagos e rios sendo renomeado como *ECOM* (Blumberg 2010). Posteriormente, na década de 90, foram incorporados conceitos de ressuspensão, assentamento e consolidação de sedimentos ao *ECOM* e, durante os últimos anos, desenvolveu-se o *sECOM*, que inclui condições de contorno abertas, traçadores, modelo de ondas de superfície, transporte de sedimentos e também uma melhor quantificação do cisalhamento no fundo oceânico através de um submodelo físico para a camada limite de fundo.

Equações Dinâmicas e Termodinâmicas

As equações que formam a base do modelo de circulação descrevem os campos de velocidade, elevação da superfície e os campos de temperatura e salinidade.

Considerando um sistema de coordenadas cartesianas ortogonais, com x aumentando para o leste, y aumentando para o norte e z aumentando verticalmente para cima, onde a superfície livre está localizada em $z = \eta(x, y, t)$ e o fundo está em $z = -H(x, y)$, temos a equação da continuidade:

$$\nabla \cdot \vec{V} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

onde $\vec{V}$ é o vetor velocidade horizontal, com componentes u e v , e ∇ é o operador de gradiente horizontal ($\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}$). As equações de *momentum*, discretizadas nas componentes zonal, meridional e vertical são:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla u + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_x, \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla v + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_y \quad (4)$$

e

$$\rho g = \frac{\partial P}{\partial z}, \quad (5)$$

sendo ρ_o a densidade de referência, ρ a densidade local, g a aceleração da gravidade, P a pressão, K_m o coeficiente vertical de mistura turbulenta e f é o parâmetro de Coriolis (aproximação do plano β , detalhes em Pedlosky (1987)).

A pressão na profundidade z pode ser obtida através da integração da Equação 5, do fundo $[z]$ até a superfície livre $\eta[0]$:

$$P(x, y, z, t) = P_{atm} + g\rho_o\eta + g \int_z^0 \rho(x, y, z', t) dz', \quad (6)$$

onde P_{atm} é a pressão atmosférica.

As equações de conservação da Temperatura e Salinidade podem ser escritas como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \theta + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_H \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + F_\theta \quad (7)$$

e

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla S + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right] + F_S, \quad (8)$$

onde θ é a temperatura potencial, S é a salinidade, e K_H é o coeficiente difusivo de mistura turbulenta de calor e sal. As equações 7 e 8 são utilizadas para o cálculo da densidade potencial em função da temperatura potencial θ e a salinidade S , de acordo com Fofonoff (1962):

$$\rho = \rho(\theta, S) \quad (9)$$

Os termos F_x , F_y , F_θ e F_S , encontrados nas equações 3, 4, 7 e 8, representam parametrizações de mecanismos de mistura horizontal dos movimentos induzidos por processos de pequena escala, que não são diretamente resolvidos pela grade do modelo. Estes termos parametrizados de difusão horizontal são baseados na formulação realizada por Smagorinsky (1963).

Fechamento Turbulento

A parametrização descrita a seguir para a turbulência no módulo hidrodinâmico do modelo numérico é baseada no trabalho de Mellor and Yamada (1974).

Os coeficientes de mistura vertical, K_M (de momentum) e K_H (de T e S), que aparecem nas equações 3, 4, 7 e 8, são obtidos através de um esquema de fechamento turbulento de segunda ordem, que caracteriza a turbulência por meio de energia cinética turbulenta, $q^2/2$, e macroescala turbulenta, ϵ , de acordo com:

$$\frac{\partial q^2}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla q^2 + w \frac{\partial q^2}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_q \frac{\partial q^2}{\partial z} \right) + 2K_M \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{2g}{\rho_o} K_H \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{2q^3}{B_l \epsilon} + F_q \quad (10)$$

e

$$\begin{aligned} \frac{\partial q^2 \epsilon}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla (q^2 \epsilon) + w \frac{\partial q^2 \epsilon}{\partial z} = & \frac{\partial}{\partial z} \left[K_q \frac{\partial}{\partial z} (q^2 \epsilon) \right] \\ & + \epsilon E_l K_M \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{\epsilon E_l g}{\rho_o} K_H \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{q^3}{B_l} \ddot{W} + F_\epsilon, \end{aligned} \quad (11)$$

onde F_q e F_ε são os termos de mistura horizontal e são parametrizados analogamente como a temperatura e salinidade, ∇ é o operador de gradiente horizontal e $\tilde{W}$ é a função de proximidade da parede, que relaciona a escala de turbulência em questão à macroescala e assegura comportamento logarítmico próximo aos contornos sólidos (Mellor and Yamada 1974), é definida por:

$$\tilde{W} \equiv 1 + E_2 \left(\frac{\varepsilon}{\kappa L} \right)^2 \quad (12)$$

onde

$$(L)^{-1} \equiv (\eta - z)^{-1} + (H + z)^{-1} \quad (13)$$

com $\kappa = 0.4$ sendo a constante von Karman (Blumberg 2010) e, embora os detalhes do módulo de fechamento turbulento estejam bastante trabalhados, é possível reduzir a prescrição dos coeficientes de mistura K_M , K_H e K_q através das seguintes equações:

$$K_M \equiv \varepsilon \cdot q S_M, \quad (14)$$

$$K_H \equiv \varepsilon \cdot q S_H \quad (15)$$

e

$$K_q \equiv \varepsilon \cdot q S_q. \quad (16)$$

As funções de S_M , S_H e S_q são analiticamente derivadas e são dependentes de $\partial u / \partial z$, $\partial v / \partial z$, $g \rho_o^{-1} \partial \rho / \partial z$, q e ε . Detalhe dos cálculos podem ser encontrados em Kantha et al. (1982).

Condições de contorno

As condições de contorno estão descritas detalhadamente em Blumberg (2010).

Superfície livre: Segundo Blumberg (2010), as condições de contorno do modelo numérico, na superfície livre $z = \eta(x, y)$ são:

$$\rho_o K_M \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial u}{\partial z} \right) = (\tau_{ox}, \tau_{oy}), \quad (17)$$

$$\rho_o K_H \left(\frac{\partial \theta}{\partial z}, \frac{\partial S}{\partial z} \right) = (\phi, SS), \quad (18)$$

$$q^2 = B_l^{2/3} u_{\tau_s}^2, \quad (19)$$

$$q^2 \varepsilon = 0 \quad (20)$$

e

$$w = u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial t}, \quad (21)$$

onde (τ_{ox}, τ_{oy}) correspondem ao vetor tensão de cisalhamento do vento nas direções x e y, e u_{τ_s} corresponde a magnitude deste vetor. A quantidade $B_l^{2/3}$ é uma constante empírica adimensional obtida das relações de fechamento turbulento, ϕ é o fluxo de calor do oceano, $SS \equiv S(0)[Ev - Pr]/\rho_o$, onde $[Ev - Pr]$ é a diferença entre a taxa de evaporação e de precipitação, e $S(0)$ é a salinidade da superfície.

Camada de fundo e Contorno lateral fechado: Nos contornos fechados (lateral e no fundo) os gradientes normais de temperatura e salinidade são nulos para que fluxos de calor ou salinidade sejam nulos através desses contornos. Nos contornos laterais fechados, referente ao continente, foi assumida a condição de livre escorregamento com velocidades perpendiculares ao contorno nulas.

No fundo, as condições de contorno são:

$$\rho_o K_M \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = (\tau_{bx}, \tau_{by}), \quad (22)$$

$$q^2 = B_l^{2/3} u_{\tau b}^2, \quad (23)$$

$$q^2 \epsilon = 0 \quad (24)$$

e

$$w_b = -u_b \frac{\partial H}{\partial x} - v_b \frac{\partial H}{\partial y}, \quad (25)$$

onde $H(x, y)$ é a topografia de fundo e $u_{\tau b}$ é o cisalhamento da corrente associada aos componentes de atrito de fundo (τ_{bx}, τ_{by}) , descrito como:

$$\vec{\tau}_b = \rho_o C_D |\vec{V}_b| \vec{V}_b, \quad (26)$$

cujo coeficiente de arrasto C_D é dado por:

$$C_D = \left[\frac{1}{\kappa} \ln(H + z_b)/z_o \right]^{-2}, \quad (27)$$

onde z_b e V_b estão localizados no ponto de grade próximo ao fundo e κ é a constante de von Karman. O parametro z_o depende da rugosidade de fundo local, e em ausência de informações específicas, utiliza-se $z_o = 1$ cm (Blumberg 2010).

Contornos laterais abertos: Nos contornos laterais abertos existem dois tipos de condições: de entrada e de saída. As condições de entrada são temperatura e salinidade. Nas simulações realizadas neste trabalho, a condição de contorno desenvolvida por Reid and Bodine (1968) foi usada para a elevação do nível do mar. Entretanto, para a condição de saída do contorno lateral, é utilizada a equação:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta, S) + u_n \frac{\partial}{\partial n}(\theta, S) = 0, \quad (28)$$

onde n é a coordenada normal ao contorno. A energia cinética turbulenta e macroescala turbulenta são calculadas no contorno lateral negligenciando os termos de advecção em

comparação aos outros termos da equação.

A velocidade nos contornos laterais podem ser computadas através do uso de dados em conjunto com um simples modelo diagnóstico, e uma descrição específica é dada em Kantha et al. (1982). Em relação a elevação do nível do mar, o modelo *sECOM* possui uma gama de condições que permitem a entrada/saída de energia de onda longa através dos contornos abertos para o interior do domínio do modelo. Nas simulações realizadas para este trabalho, utilizou-se a condição de contorno radiativa desenvolvida por Reid and Bodine (1968), na forma:

$$\eta = \eta_o + \lambda_t u_n \left[\frac{g}{D} \right]^{-1/2}, \quad (29)$$

onde η é a elevação do mar no contorno aberto, η_o é a elevação relacionada a maré ou variações de baixa frequência na célula da grade, u_n é a velocidade perpendicular ao contorno aberto calculada pelo modelo, g é a aceleração da gravidade e D é a profundidade associada a célula da grade. O multiplicador λ_t é calculado a cada passo de tempo, permitindo modificações na elevação do mar derivada da radiação de ondas longas (marés).

Grade e batimetria

A Figura 9 apresenta a grade e a batimetria empregada no modelo *sECOM*. A grade utilizada no modelo foi idealizada no trabalho de Pereira et al. (2007) e possui configuração ortogonal e curvilínea, com 110 pontos na direção x, que está orientada quase perpendicularmente à quebra da plataforma continental, e 137 pontos na direção y. Na direção vertical z, 37 níveis sigma foram usados e a profundidade mínima na qual o modelo resolve as equações hidrodinâmicas é de 5 m, também chamada de muro costeiro. A configuração de grade é a C de Arakawa e apresenta uma resolução horizontal variada, com espaçamento entre os pontos de grade entre 0.2 km e 5 km na direção x, para a porção que contempla a plataforma continental e de até 35 km para profundidades maiores do que 2.100 m. Para a direção y, a resolução varia de 0.5 km, na porção mais central da grade, a 35 km próximo aos contornos abertos. A grade é refinada na região do canal de São Sebastião, como é possível observar na Figura 9.

Figura 9: Grade e batimetria utilizada para as simulações hidrodinâmicas do sECOM. A região contornada em preto indica a área de estudo.

As condições de contorno foram determinadas por simulações de toda a PCSE já em desenvolvimento no Laboratório de Hidrodinâmica Costeira (LHiCO) no Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP). Além disso, o uso de um sistema de coordenadas curvilínea ortogonal no modelo aumenta a eficiência do mesmo para tratar as irregularidades da costa e também a capacidade de implementar uma alta resolução em regiões de interesse. Este fato é importante para o trabalho em questão, visto que a região de estudo é o CSS, que requer uma grade mais refinada para o estudo. Ainda que a área de estudo seja o CSS, o modelo hidrodinâmico compreende toda a plataforma continental sudeste (Figura 9). Já a Figura 10 apresenta a batimetria empregada, dando um enfoque à área de estudo.

Figura 10: Dados de batimetria e grade utilizadas no sECOM dentro do CSS. Os emissários e o correntógrafo estão indicados: emissário das Cigarras em magenta, emissário de Itaquanduba em azul, emissário do Araçá em vermelho e o correntógrafo em amarelo. As radiais em preto sul, central e norte indicam aonde foram feitas seções verticais de T e S a seguir.

Forçantes Oceânicas

A seguir apresentamos as condições iniciais utilizadas para o modelo hidrodinâmico.

Marés: A forçante de maré foi adicionada ao modelo por interpolação espacial nos contornos laterais abertos da grade com os dados fornecidos pelo TPXO 7.2, com resolução espacial de $1/4$ de grau. Os métodos utilizados pelo TPXO 7.2 podem ser consultados em Egbert et al. (1994) e Egbert and Erofeeva (2002). O modelo TPXO 7.2 fornece amplitudes e fases de elevação da superfície do mar em suas constituintes harmônicas. Para os experimentos realizados neste trabalho, foram utilizadas as constituintes semidiurnas $M2, S2, N2$ e as diurnas $K1, P1$ e $O1$ (Tabela 8). Castro (1990), a partir do estudo da componente $M2$, mostra que ao norte da PCSE as amplitudes são da ordem de

0,3 metros, com declínio até a região ao largo do Cabo de Santa Marta, extremo sul da PCSE, onde atinge 0,1 metros.

Tabela 8: Componentes de maré consideradas pelo sECOM, com base no TPXO 7.2.

Modo de maré	Componente	Período	Descrição
Semi diurna	M2	12h42	Lunar principal
-	S2	12h	Solar principal
-	N2	12h66	Lunar elíptica
Diurna	K1	23h94	Declinação diurna lunar
-	P1	24.06	Declinação diurna solar
-	O1	25.82	Declinação diurna lunar

Campos de densidade: O modelo foi inicializado com campos tridimensionais de temperatura e salinidade, representativos de uma estratificação de verão, proveniente de uma climatologia regional idealizada por (Rezende 2003), como pode ser observado nas Figuras 13 e 14. Para as simulações realizadas a partir de campos de densidade homogêneos, a temperatura e salinidade foram fixados em 25°C e 35, respectivamente. Os campos horizontais superficiais de T e S podem ser encontrados em Moraes (2016).

Figura 11: Condição inicial de temperatura superficial (°C) e salinidade para o domínio do modelo sECOM.

Figura 12: Condição inicial de temperatura superficial ($^{\circ}$ C) e salinidade para o CSS.

Figura 13: Condição inicial de temperatura ($^{\circ}$ C) na vertical para as radiais sul, central e norte no CSS (Figura 10) .

Figura 14: Condição inicial de salinidade na vertical para as radiais sul, central e norte no CSS (Figura 10).

Forçantes atmosféricas

Ventos: Utilizamos ventos de reanálise disponibilizados pelo CFSv2 (Saha et al. 2011). A reanálise de ventos usada está a 10 m da superfície terrestre e possui resolução espacial de 0.205° em x (longitude) x 0.204° em y (latitude) e resolução temporal de 6 horas.

Radiação solar: Utilizamos dados de reanálise de radiação solar dentro do modelo de CP e para o acoplamento dos modelos de CP e de CA, dentro do módulo de qualidade de água do sECOM. Esses dados foram retirados do CFSv2 disponível em Saha et al. (2011) e possuem a mesma resolução espacial e temporal dos ventos. Para as simulações hidrodinâmicas, esses dados atmosféricos não foram incorporados.

Temperatura do ar e Umidade Relativa: Utilizamos dados de reanálise de temperatura do ar e umidade relativa dentro do módulo de qualidade de água do sECOM para a realização do acoplamento dos modelos de CP e de CA. Esses dados foram retirados do CFSv2 disponível em Saha et al. (2011) e possuem a mesma resolução espacial e temporal dos ventos. Para as simulações hidrodinâmicas e no modelo de CP, esses dados atmosféricos não foram incorporados.

Validação

A validação foi obtida utilizando-se o skill (Willmott 1982) como principal análise comparativa entre os resultados do modelo e os dados coletados no CSS. Valores de skill variam entre 0 e 1 e, quanto mais próximo a 1, melhor o modelo representa o dado e, portanto, a realidade. A validação do modelo sECOM para dentro do CSS foi realizada utilizando-se dados correntográficos (Figura 10) da região central do CSS, durante o ano de 2005 para verão e inverno, pois estas séries eram contínuas no conteúdo de dados (Tabela 9).

Tabela 9: Cenários para a validação do modelo hidrodinâmico. *Sim* indica que aquela forçante foi incluída na simulação.

	Vento	Maré	Campo T-S
Verão: Janeiro 2005	Sim	Sim	Estratificado
Inverno: Julho e Agosto 2005	Sim	Sim	Homogêneo

Acoplamento de Campo Próximo e Campo Afastado

Existem dificuldades em relação aos conceitos e a manipulação de dados para conectar um modelo de campo próximo a um modelo de campo afastado euleriano de circulação. Zhang (1995) introduz quatro diferentes metodologias de acoplamento dos Campos Próximo (CP) e Afastado (CA). O método utilizado neste trabalho é o método IV descrito pelo autor (Figura 15). Ele consiste na simulação apenas das cargas dos efluentes. No último painel da Figura 15, a carga do poluente (M) é introduzida na profundidade de estabilização do jato (Z_m) estimada pelo modelo de campo próximo e é imposta ao modelo de campo distante. Efetivamente, esta opção assume que os efeitos dinâmicos são negligenciados no domínio computacional. Segundo Zhang and Adams (1999), em comparação ao primeiro método, este subestima a propagação lateral devido à omissão da circulação gravitacional. No entanto, este fator é compensado pois o espalhamento lateral é geralmente exagerado devido à difusão numérica provocada pela resolução da grade.

As fontes, suas localizações e períodos são muito relevantes para traçadores microbiológicos (Dorner et al. 2006). Seguindo o que foi feito em Gregorio (2009), o modelo de campo próximo foi incorporado ao modelo de campo afastado utilizando-se a série temporal dos dados de saída com os parâmetros das plumas do VP dentro do sE-COM. Nessa etapa, os dados de radiação solar, temperatura do ar e de umidade relativa foram incorporados.

Figura 15: Esquemas propostos por Zhang (1999) para o acoplamento entre os campos próximo e afastado de uma pluma.

O modelo de campo próximo utilizado foi o UM3 disponível pelo Visual Plumes (Frick et al. 2003) e o modelo de campo afastado foi o sECOM (Blumberg e Mellor 1987). Em ambos foi incluído o decaimento bacteriano de Mancini (1978).

Conservação de Massa

Uma transformação da concentração de CT estimada pelo UM3 para a grade do sECOM é necessária para garantir a conservação de massa do CA. Baseando-se na continuidade, utilizamos uma abordagem de célula de mistura, similar à usada por Gregorio (2009) e Dorner et al. (2006). Uma vez que as células computacionais dos distintos modelos possuem dimensões diferentes, as concentrações de CT precisam ser transformadas para o ponto de grade que corresponde a localização da pluma de cada emissário (Figura 16). Como a pluma resultante do CP é sempre menor do que o ponto de grade onde o emissário se encontra no CA, podemos extrapolar a concentração do CP para o

CA utilizando a Equação 30:

$$\sum CCA_n = \frac{\sum CCP * \sum Vol_{CPn}}{\sum Vol_{CA}} \quad (30)$$

, onde CCP é a concentração do campo próximo, CCA é a concentração do campo afastado, Vol_{CP} é o volume da esfera gerada pelo UM3 no campo próximo (CP) e Vol_{CA} é o volume da célula de grade no campo afastado (CA). n representa o índice das camadas verticais σ .

Figura 16: Relação entre a pluma prevista pelo modelo de CP, em forma de esfera (em vermelho), e a grade numérica, em forma cúbica, usada no modelo de CA sECOM.

Módulo de Qualidade de Água: Trajetória de Traçadores ou Patógenos

Para as nossas simulações, utilizamos o módulo de qualidade de água do *sECOM*, de trajetória de traçadores ou patógenos (*Tracer/Pathogen Fate Module*, (Blumberg 2010)), afim de se estudar o transporte e o destino de CT que são despejados pelos três emissários submarinos no CSS. A gravação dos resultados foi realizada a cada 3 horas.

As abundâncias de organismos entéricos em sistemas naturais são determinadas por taxas de *inputs* (cargas) provindas de fontes da costa ou de emissários submarinos, transporte por correntes e processos de dispersão e perda que incluem fototoxicidade, temperatura, salinidade, predação, morte e assentamento. Esses fatores podem ser apresentados em graus variados dependendo da localização e situação. A distribuição resultante da concentração do organismo vai refletir o decaimento (ou crescimento) do organismo em função das escalas espaciais e temporais do corpo de água.

A equação principal desse módulo é a de difusão tri-dimensional dependente no tempo, representando os processos de perda, dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial Cu}{\partial x} + \frac{\partial Cv}{\partial y} + \frac{\partial Cw}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial z} \right) + F_c + kC, \quad (31)$$

onde t é o tempo, x é a componente espacial leste-oeste, u velocidade zonal, y é a componente espacial norte-sul, v velocidade meridional, z é a componente vertical, w velocidade vertical, C é a concentração do organismo patógeno, k é o coeficiente de mortalidade ou taxa de decaimento, F_c representa a difusão horizontal da bactéria patógena e K_H é o coeficiente de difusão vertical.

Populações de CT exibem um número padrão de mortalidade em experimentos laboratoriais quando o esgoto é diluído pela água em experimentos para simulação da descarga de dejetos no corpo d'água receptor (Mancini 1978). Estimativas iniciais de k foram obtidas em estudos especiais em laboratórios (Mancini 1978). Esses estudos indicaram que o valor de k para as bactérias CT (a 20°C) na água do mar variam entre 0.8/dia e 1.4/dia. Thomann and Mueller (1987) apresentam a seguinte relação funcional da taxa de mortalidade de bactérias CT:

$$k = k_d + k_i + k_s, \quad (32)$$

onde k_d é o coeficiente de taxa de mortalidade no escuro, incluindo efeitos de temperatura, salinidade e predação k_i é o coeficiente de taxa de mortalidade devido a irradiância e k_s é o coeficiente de taxa de perda por sedimentação, todos em dia^{-1}).

Considerando que k_s é zero e desprezando o efeito da predação sob a concentração de CT, chegamos ao decaimento proposto por Mancini (1978):

$$k = [0.8 + (0.006 \times \frac{S}{35} \times 100)] \times 1.07^{T-20} + \frac{I_a}{k_e H} \times [1 - e^{-k_e H}] \quad (33)$$

onde k é a taxa de decaimento bacteriano, S é a salinidade, T é a temperatura ($^{\circ}$), H é a profundidade (m), k_e é coeficiente de extinção de radiação solar na profundidade (m^{-1}), I_a é a radiação solar (Langley/h).

A principal forçante para o decaimento bacteriano é a radiação solar (Mancini 1978; Gubitoso 2010; Feitosa 2007; Wen et al. 2017). De acordo com Wen et al. (2017), o valor de 0.8 na Equação 33 proposto por (Mancini 1978), pode ser um pouco alto para

representar o decaimento bacteriano de CT. Entretanto, na falta de um menor valor que fosse confiável, optamos por utilizar o valor de 0.8 na equação. Para incluir os efeitos da irradiância no modelo, dados de radiação solar, temperatura do ar e umidade relativa foram obtidos de Saha et al. (2011) e colocados como condição inicial no módulo de qualidade de água. Dessa forma, com o uso da Equação 33, o modelo *sECOM* foi capaz de simular a dispersão de CT como traçadores das plumas dos emissários submarinos de forma realista. A concentração de um poluente diminui conforme a dispersão das plumas no meio aquático e, portanto, a tendência é que ocorra uma diminuição gradativa da concentração de CT de acordo com a distância percorrida pelas plumas. De fato, há um elevado dinamismo do processo de depuração de esgoto, que no caso de CT ocorre em função da radiação solar incidente, da clorinidade (salinidade) e da temperatura da água do mar (Ferreira 2015).

Indicador de poluição: coliformes termotolerantes

A CETESB utiliza coliformes fecais (ou termotolerantes) (CT) como indicador de poluição fecal em córregos e em pontos de mar aberto. Já nas praias, a CETESB utiliza enterococos como indicador. Os enterococos apresentam maior tempo de sobrevivência e maior resistência quando comparado aos CT. Entretanto, os CT são indicados para detectar descartes novos ou recentes, pois o decaimento dessas bactérias é mais rápido do que o de enterococos. Portanto, é adequado usar os CT como traçadores do material despejado por emissários submarinos, pois ele é logo constatado nas águas marinhas adjacentes. Além disso, uma maior quantidade de estudos sobre CT é verificada na literatura em relação aos enterococos e os fatores ambientais e fórmulas para o decaimento bacteriano de CT são mais conhecidos. Por essas razões, os CT foram usados como indicadores do material proveniente dos emissários submarinos do CSS.

É importante lembrar que, ao contrário dos enterococos que vivem exclusivamente no intestino humano, os CT vivem tanto em intestino humano como em outros animais homeotérmicos. O esgoto despejado através dos emissários submarinos do CSS é exclusivamente doméstico. Portanto, a maior fonte de CT nesse caso são as fezes humanas.

A quantidade máxima de CT que pode estar presente na água do mar é estabelecida pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) de acordo com a resolução

n ° 357 de 2005 (Brasil 2005), Artigo 18: "*coliformes termolerantes: para o uso de recreação de contato primário deverá ser obedecida a Resolução CONAMA no 274, de 2000.*". Assim, para o trabalho proposto, devemos ter como base essa resolução para analisar as condições da qualidade da água do mar. A Tabela 10 dispõe os limites de CT estabelecidos pela resolução CONAMA 274 de 2000, em que, em uma amostra isolada, o valor da concentração de coliformes termotolerantes não deve exceder 2500 NMP/100mL ou então 1000 NMP/100mL em 20% do tempo ou em 5 amostras consecutivas. Já o limite para bactérias enterococos para águas salinas de contato primário é de 100 NMP ou UFC/100mL.

É importante lembrar que a presença de concentrações de bactérias indicadoras de poluição na água do mar não necessariamente significa perigo à saúde humana. Apesar disso, danos à saúde humana foram estudados por Cabelli et al. (1983), por exemplo. Os autores correlacionaram alguns sintomas de doenças gastrointestinais em banhistas e a concentração de enterococos e CT nas praias. Os autores também calcularam a correlação e obtiveram 96% entre os sintomas avaliados e a concentração de enterococos e 51% entre os sintomas e a concentração de CT. Uma melhor correlação é esperada de fato para enterococos já que esses são mais persistentes no tempo.

Tabela 10: Limites da concentração de CT estabelecidos pela Resolução CONAMA no 274 de 2000 (Brasil, 2000).

CATEGORIA		Coliforme Termotolerante (100 mL)
PRÓPRIA	EXCELENTE	Máximo de 250 em 80% ou mais tempo (*)
	MUITO BOA	Máximo de 500 em 80% ou mais tempo
	SATISFATÓRIA	Máximo de 1.000 em 80% ou mais tempo
IMPRÓPRIA		Superior a 1.000 em mais
		de 20% do tempo
		Maior que 2.500 na última medição

(*) refere-se ao período de cinco amostragens

Segundo Feitosa (2007) o modelo de Mancini (1978) é um dos modelos que melhor representou o decaimento bacteriano de CT. Chamberlin e Mitchell (1978) con-

sideraram uma constante de proporcionalidade na fórmula de decaimento bacteriano de Mancini (1978), que não é utilizada por Mancini. Porém, eles não realizaram a mesma quantidade de experimentos que Mancini (1978) e, por isso, consideraremos o último modelo mais confiável, principalmente devido à todas as considerações fornecidas por Feitosa (2007).

Dados de CT foram disponibilizados pela CETESB e SABESP, mas não são coletados constantemente ao longo do tempo para as regiões de praia. Dados semanais coletados pela CETESB incluem apenas enterococos para as análises praiaais. Desta forma, apesar de ter conhecimento que enterococos e CT possuem decaimentos diferentes, utilizaremos todos os dados disponíveis para uma validação qualitativa. O auxílio de pesquisadores da SABESP e CETESB foram essenciais para adquirir dados de enterococos e CT para os emissários de Itaquaduba, Araçá e Cigarras, que envolvem pontos de coleta em mar aberto e nas praias adjacentes no CSS.

O modelo do sECOM calcula o decaimento bacteriano a partir da fórmula de Mancini (1978). Uma combinação de muitos fatores afeta a sobrevivência das bactérias nas águas oceânicas, tornando o estudo deste processo bastante complexo e multivariado.

Cenários

Adotamos os cenários descritos nas Tabelas 11 e 12 para estudar e avaliar as plumas dos emissários submarinos. Na Tabela 11 são apresentados os cenários idealizados, para compreender a atuação e influência dos diversos fenômenos na dispersão das plumas de uma forma idealizada. Na Tabela 12 são apresentados os cenários, que representam períodos reais de verão e inverno para 2013 e 2016, para comparação posterior com dados de bactérias disponibilizados pela CETESB e SABESP. Cada cenário real é composto de 3 simulações sequenciais as quais se referem aos 3 meses compreendidos de cada cenário: dezembro, janeiro e fevereiro para cenário de verão, e junho, julho e agosto para cenário de inverno. Desta forma, os meses foram enumerados em 1, 2 e 3 sequencialmente para cada cenário. Exemplo: o cenário 6 representa o período de verão de 2013 onde 6.1, 6.2 e 6.3 representam, respectivamente, as simulações dos meses de dezembro, janeiro e fevereiro de 2013 e o cenário 7 representa o período de inverno de 2013 onde 7.1, 7.2, 7.3 representam, respectivamente, as simulações dos meses de junho, julho e agosto de 2013.

Tabela 11: Cenários idealizados para a modelagem e as respectivas forçantes empregadas. CA = modelo de campo afastado, CP = modelo de campo próximo, S = empregado e X = não empregado na simulação.

Cenários	Campo de Ventos	Forçante de Maré	Radiação Solar	Campos T-S
1	NE constante CP + 0 $m.s^{-1}$ no CA	X	S	Estratificado
2	SO constante 3.0 $m.s^{-1}$ CA e CP	S	S	Estratificado
3	NE constante 3.0 $m.s^{-1}$ CA e CP	S	S	Estratificado
4	Frente fria	S	S	Estratificado
5	Frente fria	X	S	Estratificado

Para os cenários idealizados (Tabela 11) a radiação solar utilizada foi do período de dezembro de 2012 (Saha et al. 2011). A frente fria adotada para os cenários 4 e 5 foi idealizada baseada no trabalho de Nascimento, R (2017).

Tabela 12: Cenários reais para a modelagem e as respectivas forçantes empregadas. Os cenários são compostos de 3 simulações as quais são referentes aos 3 meses compreendidos em cada cenário. S = empregado e X = não empregado.

Cenários	Período de simulação	Forçante de Ventos	Forçante de Maré	Radiação Solar	Campos T-S
6	Verão (Dez, Jan, Fev) 2013	S	X	S	Estratificado
7	Inverno (Jun, Jul, Ago) 2013	S	X	S	Homogêneo
8	Verão (Dez, Jan, Fev) 2016	S	X	S	Estratificado
9	Inverno (Jun, Jul, Ago) 2016	S	X	S	Homogêneo

Interpretação de resultados

Validação qualitativa do módulo de dispersão bacteriana

A validação qualitativa foi feita comparando os resultados do modelo para os cenários reais (Tabela 12) com 156 amostras de enterococos da CETESB, 12 amostras de enterococos da SABESP e 12 amostras de CT da SABESP. Dados da CETESB são disponíveis semanalmente e dados da SABESP são esporádicos, que acompanham demandas empresariais (Tabela 13). A SABESP disponibilizou campanhas com coleta mensais e/ou esporádicas de CT e Enterococos e alguns desses dados estavam sem o dia do mês referente à coleta. Para a comparação qualitativa, as concentrações nos pontos de grade do modelo mais próximos aos pontos de praia da CETESB (Preta do Norte, Itaquanduba e Cigarras) foram comparados aos dados. Ou seja, teremos 3 pontos de grade escolhidos no modelo e cada um corresponde a uma praia supracitada.

Tabela 13: Dados utilizados para a comparação com o modelo.

Fonte	Indicador	Periodicidade	Período
CETESB	Enterococos	semanal	12-2012 a 02-2013 06-2013 a 08-2013
SABESP	Enterococos e CT	mensal ou esporádica	12-2015 a 02-2016 06-2016 a 08-2016

Realizamos a normalização das concentrações seguindo a Equação 34:

$$C_{norm} = \frac{C - \min(C)}{\max(C) - \min(C)} \quad (34)$$

onde C_{norm} é a concentração adimensional normalizada que pode variar de 0 a 1, C é a concentração do modelo ou do dado e $\min(C)$ e $\max(C)$ são os valores de concentração mínimo e máximo da série temporal analisada, respectivamente.

Aplicamos também a metodologia proposta por Wen et al. (2017) para comparar dados e resultados de modelo de enterococos e CT. O coeficiente de variação (CV) foi calculado de acordo com (Wen et al. 2017), que mede a dispersão dos resultados do modelo em relação ao valor médio das observações. Se $CV = 0$, não há variabilidade e todos os valores de um conjunto são iguais. Quanto menor (maior) é CV, menos (mais) dispersos são os resultados de modelo em relação ao valor médio das observações. Se $CV > 1$, considera-se que o conjunto apresenta alta variabilidade.

Divisão do CSS em setores

O CSS foi dividido em 10 setores com a motivação de avaliar as regiões mais impactadas pelos emissários submarinos. Considerando que o vento é sinótico e praticamente homogêneo espacialmente dentro do CSS (mesmo com a presença do vento remoto), pudemos calcular a sua média espacial para avaliar o seu efeito nas concentrações de CT ao longo do tempo. O vento foi avaliado para todos os cenários, exceto para o cenário 1, pois não é forçado pelo vento. De acordo com Castro (1990), a forçante de maré atua de forma praticamente igual em todo o CSS. Desta forma, também podemos realizar a média espacial desta forçante no canal para avaliar a sua influência nas concentrações. Isso foi feito entre os cenários 4 e 5, que se diferenciam pela presença (cenário 4) e ausência (cenário 5) da maré como forçante do modelo. As análises nos setores foram:

1. Concentração máxima na coluna de água para cada setor;
2. Média geométrica no tempo da concentração máxima encontrada no setor a cada passo de tempo.

Além disso, calculamos a média geométrica (MG) para a concentração máxima encontrada em toda a simulação na coluna de água em um determinado setor. A MG foi calculada apenas para fins qualitativos e não possui significado quantitativo para este trabalho. Também estimamos o valor máximo encontrado na série temporal da concentração de CT para cada setor em cada uma das simulações. Os parâmetros desvio padrão e concentração mínima também foram estimados para cada setor. Essas informações foram dispostas em tabelas.

A MG é uma medida adequada para análises estatísticas de parâmetros microbiológicos. A MG é dada pela raiz em n do produto de n valores do conjunto $x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdots x_n$ de acordo com a Equação 35:

$$MG = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdots x_n} \quad (35)$$

Persistência no tempo

Mapas de persistência no tempo foram elaborados para concentrações de CT que foram maiores que 10 e 100 NMP/100mL. Ou seja, avaliamos a porcentagem do tempo de simulação em que uma determinada região ou ponto de grade do modelo esteve com concentrações acima de 10 e 100NMP/100mL para cada cenário. No caso dos cenários idealizados, cada mapa representa o resultado para 20 dias de simulação. No caso dos cenários reais, cada mapa representa a persistência para 30 dias de simulação de cada cenário, os quais possuem 90 dias de simulação total.

Apresentamos as persistências no tempo para concentrações na coluna d'água de CT > 10 NMP/100mL e > 100 NMP/100mL em formato de mapas e tabelas e concentrações acima de 1000NMP/100mL são pontuadas no trabalho.

Resultados e Discussão

Os resultados estão divididos em quatro seções principais: interpretação de dados, modelagem hidrodinâmica, modelo de CP e o acoplamento realizado entre CP e CA.

Interpretação de dados

A Figura 17 apresenta a região de estudo com os emissários submarinos estudados e também os pontos amostrais da CETESB escolhidos para comparar com os resultados de modelo.

Figura 17: Mapa do CSS com a batimetria da região, posição dos emissários submarinos, do fundeio e dos pontos costeiros e de praias monitorados pela CETESB. Os pontos costeiros correspondem às estrelas pretas 1, 2 e 3 na baía de Caraguatatuba e de 1 a 5 no CSS. Os pontos de praias são as estrelas laranjas: 1 indica a praia Preta do Norte, 2 indica a praia de Itaquanduba e 3 indica a praia das Cigarras.

As Tabelas 14 e 15 mostram uma síntese das concentrações de CT obtidas em diversas campanhas da CETESB (CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO

DE SÃO PAULO 2012; CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO 2013; CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO 2014b; CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO 2015; CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO 2016a; CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO 2017a) para os pontos costeiros (Figura 17) para o CSS e para a baía de Caraguatatuba, respectivamente. Podemos notar que todos os pontos analisados respeitaram o limite de 1000 NMP/100mL ou UFC/100mL (Tabela 10) em todo o período, exceto para um caso no ponto 4 em maio/2016 (período não analisado). As baixas concentrações de CT encontradas são um indício de que a hidrodinâmica local no CSS é capaz de dispersar os CT de maneira eficiente, chegando a apresentar concentrações abaixo do limite de detecção do método (<1 UFC/100mL). É importante notar que todos os pontos amostrados se encontram na região central do canal, afastados a pelo menos 1 km da costa e, portanto, das praias (Figura 17).

Não há dados nos pontos costeiros da CETESB para dezembro, janeiro e fevereiro de 2013 e 2016, e junho, julho e agosto de 2013 e 2016 (Tabelas 14 e 15). Desta forma, não foi possível a comparação dos resultados de modelo com dados para esses pontos. De qualquer forma, as concentrações nos pontos costeiros foram inferiores a 17 UFC/100mL em todo período avaliado. Em muitos casos, elas foram abaixo do limite de detecção do método (<1 UFC/100mL).

A Figura 18 apresenta todos os dados de enterococos e CT disponibilizados pela CETESB e SABESP nos períodos dos cenários 6, 7, 8 e 9 (Tabela 12) para os três pontos de praia analisados neste trabalho: praia de Itaquanduba, praia das Cigarras e praia Preta do Norte (Figura 17). Ao contrário dos pontos costeiros, os pontos de praia monitorados pela CETESB possuem periodicidade suficiente para a análise qualitativa do modelo. Porém, o indicador monitorado nesse caso é o enterococos e não o CT, indicador usado no modelo. Utilizamos também os dados disponíveis pela SABESP de enterococos e CT para complementar aos dados da CETESB.

Em muitas ocasiões, as observações de concentração de enterococos foram acima de 100 UFC/100mL, limite máximo estabelecido pelo CONAMA (Tabela 10) tornando as praias impróprias para banho como, por exemplo, dos dias 12/12/2012, 09/01/2013, 15/01/2013, 20/01/2013, 17/02/2013, 30/06/2013 e 21/08/2016 (Figura 18), em que as concentrações foram acima de 1000 UFC/100mL. O pico do dia 20/01/2013 no dado da

Pontos Costeiros - Concentração de CT (UFC/100mL)

Data	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5
	S	M	F	S	M	F	S	M	F	S	M	F	S	M	F
24/02/10	1	2	1	<1	1	< 1	1	<1	<1	-	-	-	-	-	-
31/08/10	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	-	-	-	-	-	-
26/04/11	<1	<1	3	3	4	<1	1	15	1	12	24	76	16	8	19
25/10/11	< 1	1	<1	< 1	1	<1	3	27	1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
10/04/12	14	27	5	4	4	5	16	3	4	24	4	3	1	3	5
28/08/12	< 1	1	<1	1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1	1
07/05/13	< 1	< 1	<1	<1	2	3	1	2	1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
24/09/13	7	1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	9	4	3	7	9	6
20/05/14	6	5	7	<1	7	17	<1	8	8	2	16	4	<1	2	2
28/10/14	<1	2	<1	1	<1	<1	1	<1	5	<1	7	<1	1	<1	<1
13/05/15	<1	2	6	5	6	7	<1	<1	<1	<1	1	<1	1	<1	<1
22/09/15	<1	1	<1	<1	<1	<1	1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
10/05/16	<1	<1	<1	<1	1	<1	2	<1	<1	7	1	1040	2	8	<1
13/09/16	<1	5	17	1	8	5	3	22	4	1	<1	<1	1	<1	<1

Pontos Costeiros - Concentração de CT (UFC/100mL)

[illegible]

CETESB também foi observado no dado de CT da SABESP, acima de 1000 UFC/100mL e, portanto, acima do limite CONAMA (Tabela 10). Nos dias 12/12/2012, 09/01/2013, 16/01/2013, 23/01/2013, 31/01/2013 e 21/02/2013, a concentração de enterococos medido pela SABESP na praia de Itaquanduba foi no limite de não-detecção (<1 UFC/100mL). Já as concentrações de CT foram mais altas nesses dias, chegando a 10^4 UFC/100mL no dia 13/01/2013. Isso mostra a utilidade em se usar mais de um microorganismo como indicador de poluição nas análises, já que, em uma única amostra, as concentrações de enterococos e CT podem ser muito diferentes, o que pode trazer interpretações distintas.

De acordo com as observações na Figura 18, no verão de 2013, aproximadamente 36% das concentrações de enterococos da CETESB, 40% das concentrações de enterococos da SABESP e 40% das concentrações de CT da SABESP estavam acima do limite estabelecido pelo CONAMA (Tabela 10). No inverno de 2013, 20% das concentrações de enterococos da CETESB estavam acima do limite CONAMA (Tabela 10). No verão de 2016, 10% das concentrações de enterococos da CETESB e no inverno de 2016, 13% das concentrações de enterococos da CETESB estavam acima do limite CONAMA (Tabela 10). No verão e no inverno de 2013, as concentrações de CT e enterococos da SABESP não apresentaram desconformidade com a lei e no inverno de 2016 não havia dados da SABESP. Portanto, de forma geral, a pior situação, nos dados de CT, foi no verão 2013, seguido pelo inverno de 2013, verão de 2016 e inverno de 2016 nessa ordem. Podemos dizer que o ano de 2013 foi mais poluído do que o ano de 2016 para as três praias avaliadas.

Chuvas intensas comprometem a qualidade das praias, uma vez que carregam para o mar a água dos cursos d'água e canais pluviais que podem estar contaminadas com esgotos sanitários ou mesmo com cargas difusas sendo portanto uma fonte poluidora adicional e que não é contabilizada pelos emissários submarinos. Como exemplo disso, apresentamos a Figura 19, que mostra a quantidade de chuva mensal para 2016 comparativamente a média de 2011 a 2016, e a Figura 20 que mostra as praias impróprias no litoral norte paulista durante 2016.

Em agosto de 2016 ocorreu a maior porcentagem de praias impróprias em 2016 (Figura 20) devido à entrada de frente fria e consequentemente às fortes chuvas na região no dia 20/08/2016 (Figura 19). Alguns valores relativamente altos foram observados em janeiro e em novembro (Figura 20). É possível observar que a média anual de chuvas

esteve abaixo da média histórica em 2016, mostrando que 2016 foi um ano relativamente seco e isso pode ter causado uma menor concentração de bactérias em 2016 nas praias avaliadas na Figura 18 comparativamente ao ano de 2013. No litoral norte, com exceção dos meses de junho e agosto, todos os meses tiveram chuvas inferiores a média histórica (Figura 19), o que resultou em baixa porcentagem de praias impróprias nesse ano comparativamente ao ano de 2013.

Cabe ressaltar que este efeito da chuva não foi incluído neste trabalho e, portanto, deve-se levar em conta esta limitação. Dorner et al. (2006) reforçam a importância de se incluir o transporte terrestre no modelo para prever a concentração realística de bactérias em sistemas aquáticos. Os autores afirmam que o intenso transporte do continente durante tempestades gera as maiores concentrações de bactérias. Além disso, os autores alegam que o rápido crescimento nas concentrações de bactérias sugere que a ressuspensão de microorganismos do sedimento pode ter importância igual ou superior às fontes continentais.

As amostras das concentrações de bactérias disponibilizadas pela CETESB e SABESP (Figura 18) alcançaram ordem de 10^5 UFC/100mL no verão de 2013 enquanto que no verão de 2016 as concentrações foram de ordem máxima de 10^3 UFC/100mL, mostrando que as praias em questão estavam mais poluídas no verão de 2013 do que em 2016. Em relação ao inverno, a ordem de grandeza máxima da concentração foi de 10^3 UFC/100mL, tanto em 2013 quanto em 2016, com diferenças menos evidentes entre esses anos se comparado ao verão. É possível observar concentração de enterococos da ordem de 10^3 UFC/100mL na praia Preta do Norte no dia 21/08/2016 (cenário 9), que corrobora com a maior quantidade de chuva registrada (Figura 19) e de praias impróprias observadas (Figura 20).

Figura 18: Dados de bactérias para os três pontos de praia da CETESB e da SABESP: praia de Itaquanduba, praia das Cigarras e praia Preta do Norte que estão indicados por estrelas laranjas na Figura 17, para os cenários 6, 7, 8 e 9 (Tabela 12) de acordo com a numeração na figura.

Figura 19: Comparação dos totais mensais de chuvas de 2016 e média histórica de 2011 a 2016 para o Litoral Norte (UGRHI 3 em CETESB (2017)). Fonte: Gráfico 6.8 de CETESB (2017).

Figura 20: Porcentagem semanal de praias classificadas como impróprias pela CETESB em 2016 no Litoral Norte. Fonte: Gráfico 6.7 de CETESB (2017).

Modelagem Hidrodinâmica (sECOM)

Esta etapa do trabalho consistiu em realizar as simulações hidrodinâmicas e, assim, obter os campos necessários para serem utilizados como entrada no modelo de CP. Realizamos simulações para os cenários descritos nas Tabelas 11 e 12.

Validação

O modelo sECOM foi anteriormente validado para três pontos fora do CSS, no domínio da PCSE, na PCI, PCM e PCE no trabalho de Moraes (2016). No presente trabalho, a validação para dentro do CSS foi realizada.

A Figura 21 apresenta os resultados de campos médios de correntes para as simulações de verão e inverno de 2005 na superfície e fundo. Em média, as correntes de superfície do CSS escoam para sudoeste, seguindo a direção dos ventos típicos de nor-

deste. É possível notar velocidades médias máximas de aproximadamente 0.15 m.s^{-1} no canal de navegação, mais próximo à Ilhabela. Além disso, durante o verão as correntes de superfície são mais intensas do que no inverno. As correntes de fundo apresentam inversão de direção ao sul do canal entre o período de verão e inverno (Figura 21). Esse fato é esperado pois no verão existe a intrusão da massa de água Água Central do Atlântico Sul (ACAS) pelo fundo da entrada sul do CSS (Coelho 1997; Castro e Miranda 1998). A presença da ACAS no CSS já foi detectada por outros autores, tanto em observações (Coelho 1997; Castro e Miranda 1998; Castro et al. 2008; Dottori et al. 2015) quanto em experimentos numéricos (Silva et al. 2005). Os ventos sinóticos na PCSE são responsáveis pela chegada da ACAS ao CSS e a força do gradiente de pressão, com grande contribuição dos gradientes de densidade, forçam esta massa de água para dentro do canal. Este processo é mais intenso no verão do que no inverno, além de ser mais intenso no sul do que no norte do CSS (Silva et al. 2005).

Figura 21: Direção e magnitude médias mensais das correntes de superfície para janeiro (verão) (A) e para julho (inverno) (B) e de fundo para janeiro (C) e julho (D) de 2005.

As Figuras 22 e 23 apresentam as séries temporais para as correntes superficiais paralela e perpendicular à costa e de fundo para verão e inverno de 2005, do sECOM, e do dado medido no fundeiro. Os dados de inverno de fundo apresentavam problemas e foram descartados. Skill de 0.72 foi obtido para a corrente superficial paralela à costa para o inverno, representando o melhor resultado alcançado. Skill de 0.71 foi obtido para a corrente de fundo paralela à costa durante o verão, sendo o segundo melhor resultado alcançado. Desse modo, as correntes resultantes do modelo sECOM foram validadas dentro do CSS. A Figura 24 apresenta o diagrama de Taylor (Taylor 2001) para o melhor

skill obtido (paralela à costa para julho de 2005) (Figura 23).

Figura 22: Série temporal das componentes paralela e perpendicular à costa de superfície e de fundo para o verão de 2005.

Além da validação para o ano de 2005, posteriormente, fizemos também a comparação entre os dados e os resultados de modelo para o verão e o inverno de 2013 e 2016, que são os períodos dos cenários 6, 7, 8 e 9 para as correntes paralelas à costa, pelo fato de serem mais energéticas que as perpendiculares à costa na região (Dottori and Castro 2009) e pela sua magnitude ser superior à componente perpendicular à costa dentro do CSS (Silva et al. 2005). Os skills foram calculados e estão apresentados na Tabela 16.

Cabe destacar os valores obtidos para janeiro e agosto para os dois anos avaliados. Nesses dois meses, com mais de 30 dias de dados, o skill ficou entre 0.51 (componente paralela de fundo em agosto de 2016) e 0.72 (componente paralela de superfície em agosto de 2013 e 2016). O skill para a corrente paralela de fundo foi geralmente mais baixo do que o skill para corrente paralela de superfície. Isso provavelmente ocorre pois, no modelo, utilizamos uma climatologia de temperatura e salinidade fixa para o verão, o que na realidade pode variar ao longo dos anos. A corrente paralela de fundo resultante do modelo na maioria das simulações apresenta intensidade mais baixa do que a realidade. Isso pode ser observado através do painel esquerdo da Figura 25.

A Figura 25 apresenta as séries temporais e o diagrama de Taylor especifica-

mente para janeiro e agosto, comparando a componente paralela dos dados e dos resultados do modelo. Os coeficientes de correlação encontrados foram de aproximadamente: 0.49, 0.44, 0.65, 0.71, 0.56, 0.80, 0.66, como mostrado na Figura 25 e reforçado pela Tabela 17.

Figura 23: Série temporal das componentes paralela e perpendicular de superfície e de fundo para o inverno de 2005.

Figura 24: Diagrama de Taylor para julho 2005 da componente de velocidade paralela à costa na superfície. A esquerda: série temporal do correntógrafo (pontos pretos) e do resultado do modelo (linha azul) para julho de 2005. A direita: diagrama de Taylor comparativo entre o modelo sECOM (*model 1*) e o dado (*reference*).

Tabela 16: Skill entre as observações e os resultados de modelo da componente da velocidade paralela à costa na superfície (VSUP = 5 m de profundidade) e no fundo (VFUN = 15 m de profundidade) para os cenários 6.1 (dezembro 2012), 6.2 (janeiro 2013) e 6.3 (fevereiro 2013); 7.1 (junho 2013), 7.2 (julho 2013) e 7.3 (agosto 2013); 8.1 (dezembro 2015), 8.2 (janeiro 2016) e 8.3 (fevereiro 2016); e 9.1 (junho 2016), 9.2 (julho 2016) e 9.3 (agosto 2016). Nota: d = dias.

-	verão 2013	6.1 (10d)	6.2 (30d)	6.3 (6d)
VSUP	0.57	0.32	0.66	0.54
VFUN	0.50	0.35	0.52	0.85
-	inverno 2013	7.1	7.2 (3d)	7.3 (30d)
VSUP	0.71	-	0.44	0.72
VFUN	0.52	-	0.36	0.52
-	verão 2016	8.1 (22d)	8.2 (30d)	8.3 (22d)
VSUP	0.50	0.39	0.60	0.46
VFUN	-	-	-	-
-	inverno 2016	9.1	9.2 (30d)	9.3 (30d)
VSUP	0.59	-	0.35	0.72
VFUN	0.46	-	0.36	0.51

O modelo representou melhor as observações principalmente em agosto de 2013 e 2016, que apresentaram skills de 0.71 e 0.80, e skill de 0.72 e 0.72, respectivamente, para a componente paralela à costa de superfície e de fundo. Mesmo utilizando-se uma climatologia de T e S para todos os cenários de verão, o campo homogêneo utilizado para as simulações de inverno parecem representar melhor a realidade quando comparamos os resultados de janeiro e de agosto para 2013 e 2016. Os meses de dezembro (cenários 6.1 e 8.1) foram os que menos representaram a realidade, com skills abaixo de 0.39. Já os meses de janeiro apresentaram skills plausíveis de 0.66, 0.52 e 0.60. Os meses de fevereiro apresentaram alta correlação durante 2013 com skill de 0.54 e 0.85, porém apenas 6 dias de dados estavam disponíveis. Já fevereiro de 2016 mostra skill de 0.46 para 22 dias de dados. Os meses de junho não tinham dados. Os meses de julho apresentaram skills baixos de 0.44, 0.36, 0.35 e 0.36 (Tabela 16). As correlações para as correntes em janeiro foram de 0.49 (a 5 m) e 0.44 (a 15 m) em 2013 e de 0.65 (a 5 m) em 2016, bem inferiores aos valores para correntes durante agosto de 0.71 (a 5 m) e 0.56 (a 15 m) em 2013 e 0.80 (a 5 m) e 0.66 (a 15 m) em 2016 (Tabela 17).

Em suma, o modelo hidrodinâmico sECOM foi validado quantitativamente com séries correntográficas geradas nas campanhas hidrográficas realizadas por pesquisadores do LHiCO no CSS para períodos de verão e de inverno. De forma geral, o modelo hidrodinâmico foi capaz de reproduzir satisfatoriamente as observações correntográficas do

CSS.

Figura 25: Séries temporais (a esquerda) e diagrama de Taylor (a direita) da componente de velocidade paralela à costa (V) para os meses de janeiro (verão) e agosto (inverno) de 2013 e 2016 na superfície (5m) e no fundo (15m). Comparações entre o modelo (mod) e dados do ADCP do fundeio no CSS (dado), ambos demonstrados com resolução temporal de 6 horas. **Referência** indica o desvio padrão igual a 1.0, Vsupv2013, Vsupv2016 indicam V em superfície durante verão (janeiro) de 2013 e 2016, respectivamente, assim como Vsupi2013, Vsupi2016 indicam V em superfície (5 m) durante o inverno (agosto) de 2013 e 2016, respectivamente. O mesmo vale para Vfunv2013, Vfunv2016, Vfuni2013 e Vfuni2016, mas para V de fundo (15 m).

Tabela 17: Coeficientes de correlação para janeiro e agosto de 2013 e 2016 entre dados do fundeio e resultados de modelo da componente de velocidade paralela à costa (V) na superfície (5 metros) e no fundo (15 metros), mesmos coeficientes apresentados no Diagrama de Taylor acima.

-	janeiro 2013	janeiro 2016	agosto 2013	agosto 2016
V 5 m	0.49	0.65	0.71	0.80
V 15 m	0.44	-	0.56	0.66

Modelagem do Campo Próximo

Os dados de cada emissário para inicialização do Visual Plumes (UM3) estão descritos na Tabela 18 (SABESP 2015; SABESP 2014; SABESP 2013; CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO 2007a; CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO 2007b). Os valores de concentração e vazão do efluente utilizados para o modelo de CP foram considerados como

limites máximos teóricos, constantes e de projeto dos emissários. Na prática, esses valores variam dependendo da carga que chega aos emissários. Portanto, podemos considerar que estamos trabalhando com situações de vazão e concentração máximas estabelecidas, o que nos fornecerá a pior situação possível em cada cenário. Os resultados do *CP* variam de acordo com os valores de temperatura, salinidade e velocidades (u e v) impostos.

Tabela 18: Dados iniciais para o modelo de CP para os emissários do Araçá, Cigarras e Itaquanduba. Nota: a vazão e a concentração utilizada são as de projeto dos emissários e foram consideradas constantes ao longo do tempo.

Emissário	Araçá	Cigarras	Itaquanduba
Diâmetro dos difusores	0.09	0.05	0.075
Elevação dos difusores	0.4	0.16	0.45
Ângulo vertical (°)	0	90	0
Ângulo horizontal (radianos)	-0.554	-0.8719	-0.520
Número de difusores	6	22	16
Espaçamento dos difusores	4.2	0.25	4.5
Profundidade do difusor	17	8.5	37
Vazão do efluente (m ³ .s)	0.140	0.0116	0.100
Salinidade do efluente	0	0	0
Temperatura do efluente (°C)	25	25	25
Concentração do efluente (NMP/100mL)	4.800.000	5.400.000	4.800.000

Fonte: Livro dos emissários submarinos (CETESB, 2007a).

Plumas dos emissários

Nesta seção apresentamos as plumas nos instantes finais do modelo de CP para ilustrar os resultados gerados no CP que foram utilizados como condição inicial no modelo de CA. Os cenários idealizados são os descritos de 1 a 5 (Tabela 11) e os cenários reais de 2013 e 2016 são descritos de 6.1 a 9.3 (Tabela 12).

Cenários idealizados

As Figuras 26, 27, 28, 29 e 30 apresentam o instante final do CP para a concentração da pluma de cada emissário estudado - Araçá, Cigarras e Itaquanduba - para os cenários 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente. Podemos notar que todas as plumas no cenário 1 estão se deslocando para sudoeste, seguindo a direção do vento de nordeste imposto. Os maiores deslocamentos horizontais são observados para o emissário de Itaquanduba, de aproximadamente 14.7 m de leste para oeste e de 20 m de norte para sul. A pluma de Cigarras possui o menor deslocamento horizontal dentre os emissários, sendo este de

aproximadamente 6 m de leste para oeste e de 5 m de norte para sul. A pluma do Araçá apresenta um deslocamento horizontal da pluma de aproximadamente 13 m de norte para sul. Na direção leste-oeste o deslocamento máximo foi de 5 m. A pluma do Araçá foi a que apresentou maior diâmetro relativamente à Cigarras e Itaquanduba de aproximadamente 26 m e foi a única que atingiu a superfície (Figura 26).

Figura 26: Esquema 3-D da concentração de CT no instante de tempo final das plumas dos emissários do Araçá, Cigarras e Itaquanduba, nesta ordem, utilizado no cenário 1. As plumas estão se deslocando para sudoeste pois foi usado vento de nordeste para o cenário do UM3 (Visual Plumes).

No cenário 2 (Figura 27), todas as plumas seguem a direção do vento de sudoeste e portanto se deslocam para nordeste com deslocamento positivo na direção zonal e meridional. A pluma do Araçá apresenta o maior deslocamento horizontal, com 35 m de oeste para leste e de 15 m de sul para norte, aproximadamente. A pluma de Cigarras apresenta o menor deslocamento de 4 m de oeste para leste e de 3 m de sul para norte, atingindo a superfície. A pluma de Itaquanduba se deslocou 23 m de oeste para leste e 10 m de sul para norte, aproximadamente. A pluma do Araçá apresenta o maior diâmetro, de aproximadamente 23 m, dentre os emissários, assim como no cenário 1.

Figura 27: Idem a Figura 26 para o cenário 2.

No cenário 3 (Figura 28) nenhuma pluma atingiu a superfície do mar. A pluma do Araçá apresenta o maior diâmetro dentre os emissários, de aproximadamente 15 m e um pequeno deslocamento de leste para oeste e de norte para sul de no máximo 5 m. A pluma de Cigarra possui um deslocamento de 5 m de norte para sul e de 8 m de leste para oeste. A pluma de Itaquanduba se deslocou 15 m de norte para sul e 19 m de leste para oeste. Os deslocamentos das plumas são bastante similares ao cenário 1, pois no CP o mesmo vento de nordeste foi usado nos cenários 1 e 3. A diferença entre eles está nas condições do CA (vide Tabela 11).

Figura 28: Idem a Figura 26 para o cenário 3.

No cenário 4 (Figura 29), a pluma do Araçá teve um deslocamento de oeste para leste maior do que o observado nos cenários 1 e 3 e menor do que o cenário 2, de 16 m, e um deslocamento de norte para sul de 10 m. Apresentou o maior diâmetro dentre as

plumas de 24 m, aproximadamente. A pluma de Cigarras apresentou o menor diâmetro de 0.7 m e deslocamento de oeste para leste de 1m e de 2 m de norte para sul. A pluma de Itaquanduba apresentou diâmetro de 9 m, deslocamento de oeste para leste de 5 m e de norte para sul de 11 m. Todas as plumas atingiram a superfície ao final do CP.

Figura 29: Idem a Figura 26 para o cenário 4.

No cenário 5 (Figura 30), a pluma do Araçá teve um deslocamento de oeste para leste maior do que o observado nos cenários 1, 3 e 4 e menor do que no cenário 5, de 12 m e deslocamento de norte para sul de 11.5 m, com diâmetro de 19 m, aproximadamente. A pluma de Cigarras apresentou o menor diâmetro de 3.7 m e deslocamento de oeste para leste de 3 m e de 1.5 m de norte para sul. A pluma de Itaquanduba apresentou diâmetro de 10 m, deslocamento de oeste para leste de 7 m e de norte para sul de 6 m. Apenas a pluma de Itaquanduba atingiu a superfície ao final do CP.

Figura 30: Idem a Figura 26 para o cenário 5.

Cenários reais

As Figuras 31, 32, 33 e 34 apresentam as plumas em 3-D no instante final no modelo de CP dos emissários do Araçá, Cigarras e Itaquanduba para cada um dos meses de simulação do cenário 6, 7, 8 e 9 (Tabela 12), respectivamente.

No cenário 6 (Figura 31) nenhuma pluma atingiu a superfície. Em dezembro de 2012 (cenário 6.1), a pluma do Araçá se deslocou 35 m de leste para oeste e 60 m de norte para sul, com um diâmetro de 18 m. A pluma de Cigarras se deslocou 12 m de leste para oeste e 5 m de norte para sul. A pluma de Itaquanduba se deslocou 40 m de leste para oeste e 25 m de norte para sul com um diâmetro final de 10 m aproximadamente. Em janeiro de 2013 (cenário 6.2), a pluma do Araçá apresenta o maior diâmetro encontrado no verão de 2013, de aproximadamente 18 m. O seu deslocamento de oeste para leste foi de 18 m e de no máximo 10 m de norte para sul. A pluma de Cigarras se deslocou 3 m de oeste para leste e 2.5 de norte para sul com diâmetro de 4 m. A pluma de Itaquanduba apresentou deslocamento de sul para norte de 6 m e de oeste para leste de 10 m, com diâmetro máximo de 8 m. Em fevereiro de 2013 (cenário 6.3), a pluma do Araçá apresentou um deslocamento de leste para oeste de 25 m e de 40 m de norte para sul com diâmetro de 13 m. A pluma de Cigarras apresentou deslocamento de leste para oeste de 10 m e de norte para sul de 5 m, com diâmetro de 4 m. A pluma de Itaquanduba apresentou diâmetro de 10 m, com deslocamento de 22 m de oeste para leste e de 19 m de norte para sul.

Figura 31: Esquema 3-D das plumas no instante final do CP para o cenário 6 incluindo dezembro (6.1), janeiro (6.2) e fevereiro (6.3) (de cima para baixo) e emissários do Araçá, Cigarras e Itaquaduba da esquerda para a direita.

As plumas do Araçá no cenário 7.1 e de Itaquaduba no cenário 7.3 atingiram a superfície (Figura 32). Em junho de 2013 (7.1), a pluma do Araçá se deslocou 17 m de oeste para leste e 9 m de norte para sul, com um diâmetro de 17 m. A pluma de Cigarras se deslocou 2 m de oeste para leste e 1.5 m de norte para sul. A pluma de Itaquaduba se deslocou 9.3 m de oeste para leste e 6 m de sul para norte com um diâmetro final de 5 m aproximadamente. Em julho de 2013 (7.2), a pluma do Araçá apresenta diâmetro de 18 m. O seu deslocamento de oeste para leste foi de 28 m e de 20 m de sul para norte. A pluma de Cigarras se deslocou 3 m de oeste para leste e 2.5 de norte para sul com diâmetro de 2 m. A pluma de Itaquaduba apresentou deslocamento de sul para norte de 5 m e de oeste para leste de 6 m, com diâmetro máximo de 4 m. Em agosto de 2013 (7.3), a pluma do Araçá apresentou um deslocamento de oeste para leste de 8 m e de 6 m de

norte para sul com diâmetro de 8 m. A pluma de Cigarras apresentou deslocamento de leste para oeste de 4 m e de norte para sul de 5 m, com diâmetro de 3.5 m. A pluma de Itaquanduba apresentou diâmetro de 15 m, com deslocamento de 3 m de oeste para leste e de 2 m de norte para sul.

Figura 32: Idem à figura anterior para o cenário 7.

No cenário 8 (Figura 33) as plumas do Araçá e Itaquanduba atingiram a superfície em janeiro de 2016. Em dezembro de 2015 (8.1), a pluma do Araçá se deslocou 34 m de leste para oeste e 56 m de norte para sul, com um diâmetro de 16 m. A pluma de Cigarras se deslocou 12 m de leste para oeste e 7 m de norte para sul. A pluma de Itaquanduba se deslocou 30 m de leste para oeste e 25 m de norte para sul com um diâmetro final de 10 m aproximadamente. Em janeiro de 2016 (8.2), a pluma do Araçá apresenta diâmetro de 17 m. O seu deslocamento de oeste para leste foi de 18 m e de 13 m de sul para norte. A pluma de Cigarras se deslocou 3 m de oeste para leste e 2.5 de norte para

sul com diâmetro de 3.5 m. A pluma de Itaquanduba apresentou deslocamento de sul para norte de 7 m e de oeste para leste de 10 m, com diâmetro máximo de 10 m. Em fevereiro de 2016 (8.3), a pluma do Araçá apresentou um deslocamento de leste para oeste de 15 m e de 34 m de norte para sul com diâmetro de 14 m. A pluma de Cigarras apresentou deslocamento de leste para oeste de 7 m e de norte para sul de 6 m, com diâmetro de 4 m. A pluma de Itaquanduba apresentou diâmetro de 10 m, com deslocamento de 20 m de leste para oeste e de 12 m de norte para sul.

Figura 33: Idem à figura anterior para o cenário 8.

Todas as plumas do inverno de 2016 atingiram a superfície (Figura 34). Em junho de 2016 (9.1), a pluma do Araçá se deslocou 9 m de oeste para leste e 3 m de norte para sul, com um diâmetro de 10 m. A pluma de Cigarras se deslocou menos que 1 m nas duas direções. A pluma de Itaquanduba se deslocou de forma semelhante a de Araçá, 4 m de oeste para leste e 3 m de norte para sul com um diâmetro final de 4 m

aproximadamente. Em julho de 2016 (9.2), a pluma do Araçá apresenta diâmetro de 14 m. O seu deslocamento de oeste para leste foi de 2 m e de 10 m de norte para sul. A pluma de Cigarras deslocou menos de 1 m de leste para oeste e 2 m de sul para norte com diâmetro de 3 m. A pluma de Itaquanduba apresentou deslocamento de norte para sul de 5 m e de oeste para leste de 4 m, com diâmetro máximo de 5 m. Em agosto de 2016 (9.3), a pluma do Araçá apresentou um deslocamento de oeste para leste de 6 m e de 20 m de norte para sul com diâmetro de 16 m. A pluma de Cigarras apresentou deslocamento de leste para oeste de 1 m e de sul para norte de 2 m, com diâmetro de 3.5 m. A pluma de Itaquanduba apresentou diâmetro de 5 m, com deslocamento de 8 m de oeste para leste e de 5.5 m de norte para sul.

Concluimos que, no modelo de CP, a dispersão das plumas depende majoritariamente da direção dos ventos. As plumas atingiram a superfície mais vezes nos cenários de inverno do que nos cenários de verão. Isso provavelmente ocorre devido aos ventos mais intensos nesse período e portanto uma maior mistura vertical dos CT. A pluma do emissário de Cigarras, em todos os cenários, apresentou diâmetro e dispersão menores que as plumas do Araçá e de Itaquanduba, devido a vazão inicial em Cigarras ser uma ordem de grandeza menor do que a vazão dos outros emissários. De forma geral, a pluma do Araçá apresentou os maiores diâmetros e os maiores deslocamentos horizontais nos cenários apresentados, pois a sua vazão inicial é a maior dentre os emissários. O deslocamento horizontal inicial e o diâmetro das plumas dos emissários submarinos no CP foi sempre inferior ao tamanho da grade do sECOM. A grade do sECOM apresenta células com comprimento horizontal mínimo de 80 m dentro do CSS, valor que já é bem superior aos deslocamentos e diâmetros encontrados no modelo de CP. Assim, o modelo de CP, considerando o decaimento bacteriano proposto por (Mancini 1978), teve importância para se determinar a profundidade de estabilização da pluma.

Figura 34: Idem à figura anterior para o cenário 9.

Séries temporais do campo próximo

Nesta seção apresentamos as séries temporais da concentração de CT em NMP/100mL estimados pelo CP. Essas séries temporais foram usadas como condição inicial no CA.

Cenários idealizados

As Figuras 35, 36, 37, 38 e 39 apresentam as séries temporais dos cenários 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente. As séries temporais possuem 720 hs pois incluem 30 dias de simulação para cada cenário. É possível observar o ciclo diário da concentração de CT que ocorre devido ao efeito da radiação solar introduzida no CP. Quando a radiação é máxima - ao meio dia -, a concentração é mínima pois a mortandade das bactérias aumenta com o aumento da radiação solar. Com o passar do tempo, a concentração aumenta pois a radiação solar diminui. À meia noite, quando a radiação é mínima, a concentração aumenta, alcançando um máximo.

Na Figura 35 pode-se observar um pico anômalo no início do CP para a concentração do Araçá. Excluindo este pico, observamos ciclo diários praticamente iguais ao

longo do tempo para os três emissários. Nos cenários 3 e 4, as variações de maré geraram variabilidades temporais nas concentrações de CT, que são detectadas nas Figuras 37 e 38, respectivamente. Nos cenários 4 e 5, podemos notar a chegada de três frentes frias nos instantes de tempo em 180 horas, 390 horas e 600 horas após o início da simulação, sendo que no cenário 5, a última frente fria (600 h) não alterou as concentrações dos emissários de Cigarras e Itaquanduba. Podemos notar que, quando há a passagem de frente fria, a concentração da pluma apresenta uma queda abrupta, alcançando uma concentração mínima e um pico subsequente, efeito não observado em períodos fora da passagem da frente (Figuras 38 e 39).

No cenário 1 a concentração máxima é de aproximadamente 38000 para Araçá, 8000 para Itaquanduba e 20000 para Cigarras. No cenário 2 a concentração máxima é de aproximadamente 15000 para Araçá, 10000 para Itaquanduba e 25000 para Cigarras. No cenário 3 (Figura 37) a concentração máxima é de aproximadamente 40000 para Araçá, 14000 para Itaquanduba e 55000 para Cigarras. O cenário 3 apresenta um pico de concentração para a pluma do Araçá assim como no cenário 1, o qual não é observado nos cenários 2, 4 e 5. No cenário 4 (Figura 38) a concentração máxima é de aproximadamente 26000 para Araçá, 30000 para Itaquanduba e 110000 para Cigarras. No cenário 5 (Figura 39) a concentração máxima é de aproximadamente 25000 para Araçá, 16000 para Itaquanduba e 6000 para Cigarras.

Figura 35: Série temporal da concentração de CT na profundidade de estabilização da pluma dos emissários do Araçá, Itaquanduba e Cigarras (nesta ordem de cima para baixo) para o cenário 1. Esses dados foram usados como condição inicial para o modelo de campo distante, possibilitando assim o acoplamento dos modelos Visual Plumes e sE-COM.

Figura 36: Idem a Figura anterior para o cenário 2.

Figura 37: Idem a Figura anterior para o cenário 3.

Figura 38: Idem a Figura anterior para o cenário 4.

Figura 39: Idem a Figura anterior para o cenário 5.

As Tabelas 19, 21 e 20 apresentam as concentrações mínima, máxima, média

geométrica e desvio padrão para as plumas do Araçá, Cigarras e Itaquanduba, respectivamente, para as séries temporais apresentadas dos cenários idealizados de 1 a 5 (Figuras 35 a 39).

Para a pluma do Araçá (Tabela 19), os maiores valores de concentração mínima e máxima foram durante os cenários 1 e 3 (ambos com vento constante de nordeste), indicando que ventos constantes de nordeste facilitam uma maior concentração na pluma. Além disso, no cenário 3, a média geométrica (MG) da concentração de CT no Araçá foi maior em relação ao cenário 1, que provavelmente é devido ao efeito das marés. O mesmo é observado para o cenário 4, que possui influência da maré, com MG de 13916 NMP/100mL em relação ao cenário 5 que, sem a presença da maré, obteve MG de 12231.7 NMP/100mL. Dentre os 5 cenários, a maior MG de CT foi no cenário 3, seguida pelo cenário 4. A ordem de grandeza da MG foi da ordem de 10^4 NMP/100mL para o Araçá. O cenário 2, com ventos constantes de sudoeste, apresentou as menores concentrações mínima, máxima e MG de CT além de um menor desvio padrão (Tabela 19).

Tabela 19: Concentração mínima, máxima, média geométrica e desvio padrão para a pluma do Araçá calculados para o campo próximo para cada cenário idealizado.

Cenário	1	2	3	4	5
mínimo	9081.8	5461.8	5966.8	5465.8	5775.3
máximo	38132.2	13634.4	40678.9	26866.7	25318.5
média geométrica	13806.3	9014.8	15143.6	13916.0	12231.7
desvio padrão	3304.6	1758.6	5258.8	4370.8	2692.2

Para a pluma de Itaquanduba (Tabela 20), os maiores valores de concentração máxima foram durante os cenários 3, 4 e 5, evidenciando novamente, a influência da maré no aumento da concentração da pluma nos cenários 3 e 4 e o efeito dos ventos de nordeste no aumento da concentração. O cenário 2 foi o que apresentou a menor MG da concentração de CT, evidenciando que em regime de ventos de sudoeste, uma menor concentração foi encontrada, em relação a regime de ventos de nordeste. Os maiores valores de MG foram nos cenários 4 e 5, com concentração superior no cenário 4. Na maior parte do tempo desses cenários, o vento soprou de nordeste, assim como no cenário 3. A ordem de grandeza da MG de CT foi de 10^4 NMP/100mL para Itaquanduba (Tabela 20).

Tabela 20: Idem a Tabela anterior para a pluma de Itaquanduba.

Cenário	1	2	3	4	5
mínimo	12182.3	8196.4	8174.0	7628.0	9005.2
máximo	20663.3	24693.7	52270.4	109107.3	54028.7
média geométrica	16913.1	14534.4	17903.3	27462.8	22673.7
desvio padrão	2201.3	3925.8	6726.7	17312.4	5533.5

Para a pluma de Cigarras (Tabela 21), comportamento similar foi observado em relação a pluma de Itaquanduba. Os maiores valores de concentração máxima foram durante os cenários 3, 4 e 5, evidenciando novamente, a influência da maré no aumento da concentração da pluma nos cenários 3 e 4 e o efeito dos ventos de nordeste no aumento da concentração. O cenário 2 foi o que apresentou a menor MG da concentração de CT, evidenciando que ventos de sudoeste causam uma menor concentração na pluma do que ventos de nordeste. Os maiores valores de MG foram nos cenários 4 e 5, com concentração superior no cenário 4. Na maior parte do tempo desses cenários, o vento soprou de nordeste, assim como no cenário 3. Assim, ventos de nordeste provavelmente causaram maiores concentrações de CT. A ordem de grandeza da MG de CT foi de 10^3 NMP/100mL para Cigarras.

Tabela 21: Idem a Tabela anterior para a pluma de Cigarras.

Cenário	1	2	3	4	5
mínimo	3544.6	2364.6	2377.2	3044.2	3838.6
máximo	7752.1	9181.5	12774.4	29067.9	15499.2
média geométrica	5982.3	4986.9	6461.8	9984.0	9663.5
desvio padrão	1182.1	1443.7	2463.6	4796.6	2122.3

Cenários reais

Assim como nos cenários idealizados, o ciclo diário da concentração de bactérias foi observado também nos cenários reais nas Figuras 40, 41, 42 e 43. As séries temporais possuem 2160 horas pois incluíram 90 dias (3 meses) de simulação para cada cenário.

No cenário 6 (Figura 40) a concentração máxima de CT foi de 43000 NMP/100mL, 44000 NMP/100mL e 110000 NMP/100mL para Araçá, Itaquanduba e Cigarras, respectivamente. Entradas de frentes frias ocorreram nos instantes de 950 hs, 1510 hs e 1950 hs, ocasionando as baixas concentrações encontradas sequenciais a esses instantes, por causa

do espalhamento vertical mais intenso das plumas. No cenário 7 (Figura 41) a concentração máxima foi de 35000 NMP/100mL, 30000 NMP/100mL e 115000 NMP/100mL para Araçá, Itaquanduba e Cigarras, respectivamente. Entradas de frentes frias ocorreram nos instantes de 1760 hs e 2050 hs. No cenário 8 (Figura 42), a concentração máxima foi de 41000 NMP/100mL, 34000 NMP/100mL e 100000 NMP/100mL para Araçá, Itaquanduba e Cigarras, respectivamente. É possível observar entradas de frente fria nos instantes de 300 hs e 800 hs. No cenário 9 (Figura 43) a concentração máxima foi de 38000 NMP/100mL, 35000 NMP/100mL e 115000 NMP/100mL para Araçá, Itaquanduba e Cigarras, respectivamente. Foi possível observar entradas de frente fria nos instantes de 1100 hs e 1650 hs. O cenário 6, no verão de 2013, foi o que apresentou as maiores concentrações máximas de CT para as plumas do Araçá e de Itaquanduba.

Figura 40: Idem a Figura 35 para o cenário 6.

Figura 41: Idem a Figura 35 para o cenário 7.

Figura 42: Idem a Figura 35 para o cenário 8.

Figura 43: Idem a Figura35 para o cenário 9.

Nos cenários de verão, a pluma do Araçá (Tabela 22) e de Itaquanduba (Tabela 23) apresentaram concentrações máximas mais elevadas do que nos cenários de inverno (com exceção do ano de 2016 para Itaquanduba que em que as concentrações são bastante similares entre o verão e o inverno). O oposto ocorre para Cigarras (Tabela 24), onde as concentrações são mais elevadas nos cenários de inverno do que nos cenários de verão. As concentrações máximas encontradas no verão de 2013 (cenário 6) foram superiores as do verão de 2016 (cenário 8), para todos os emissários.

As maiores MG das concentrações de CT encontradas foram no cenário 9, inverno de 2016, para todos os emissários. As maiores concentrações máximas de CT foram: nos cenários de inverno, 7 e 9, no Araçá; nos cenários de verão, 6 e 8, em Itaquanduba e no cenário de verão 6 para Cigarras. Para todos os emissários, os cenários de inverno apresentaram MG superior aos cenários de verão.

Tabela 22: Concentração mínima, máxima, média geométrica e desvio padrão para a pluma do Araçá calculados para o campo próximo para cada cenário real.

Cenário	6	7	8	9
mínimo	2352.4	2101.1	2644.8	1763.1
máximo	43521.1	35522.3	41558.5	35257.5
média geométrica	12050.0	13369.4	12416.2	14390.4
desvio padrão	6738.6	7334.3	6180.8	6980.3

Tabela 23: Idem a Tabela anterior para a pluma de Itaquanduba.

Cenário	6	7	8	9
mínimo	1419.2	1102.2	965.5	945.0
máximo	43454.1	27805.7	29002.0	29428.8
média geométrica	7418.1	7807.8	7551.0	8422.0
desvio padrão	5521.7	5737.4	4926.1	5497.2

Tabela 24: Idem a Tabela anterior para a pluma de Cigarrais.

Cenário	6	7	8	9
mínimo	4393.1	3475.2	4664.6	4359.5
máximo	104884.4	109142.0	100811.2	113523.4
média geométrica	21605.2	21846.6	22483.8	23795.3
desvio padrão	16537.7	16463.8	16740.6	17592.4

Histogramas direcionais

Os histogramas direcionais a seguir apresentam a frequência normalizada (em porcentagem) das direções e dos valores do deslocamento horizontal (em metros) e da concentração de CT (em NMP/100mL) para os cenários hidrodinâmicos. Os histogramas direcionais para a distância horizontal percorrida e para CT para os cenários 1, 2, 3, 4 e 5 estão representados nas Figuras 44 e 45, respectivamente.

Para o cenário 1, podemos notar o deslocamento horizontal e concentração de CT das plumas na direção sudoeste para o Araçá e Itaquanduba e para oeste em Cigarrais, o que é explicado pelo vento de nordeste imposto no modelo de CP. Para o cenário 2, o deslocamento e a concentração das plumas apontam para nordeste no Araçá e Itaquanduba e para leste em Cigarrais, seguindo a direção do vento, que sopra de sudoeste. No cenário 3, o deslocamento e a concentração das plumas são semelhantes ao cenário 1, que possui a mesma intensidade e direção de vento porém com a diferença do cenário 3 incluir a maré.

Pode-se notar um deslocamento superior a 25 m para a pluma do Araçá no cenário 3, que não é observado no cenário 1, que pode ser explicado pela influência da maré, que causa um maior deslocamento devido à corrente residual. O mesmo ocorre entre os cenários 4 e 5 de frente fria. O cenário 4, que contabiliza a influência da maré, apresenta deslocamento horizontal maior do que o cenário 5 para o emissário do Araçá.

Sabe-se que a baía do Araçá, por ser uma região bastante rasa tem grande influência de maré (Dottori et al. 2015), ao contrário do resto do CSS em que a força do vento domina. Podemos notar que nos cenários 4 e 5, praticamente em todo o tempo de simulações, as plumas se direcionaram para nordeste. Isso ocorreu pois o vento de nordeste constante imposto anterior às passagens de frentes frias foi relativamente fraco, de 3 m.s^{-1} , não apresentando intensidade suficiente para sobrepor a forçante termohalina. Por isso, o efeito baroclínico provavelmente sobrepôs-se à forçante de vento nesses dois cenários na maior parte do tempo. Esse fenômeno não foi observado nas plumas 3-D dos cenários 4 e 5 (Figura 29 e 30) pois elas representam apenas o último passo de tempo do CP. Já os histogramas direcionais, representam toda a série de dados, fornecendo uma visão completa dos processos do CP. Em resumo, o deslocamento horizontal das plumas em todos cenários idealizados é baixo, não ultrapassando 25 m na maioria dos casos, com exceção do emissário do Araçá nos cenários 1, 2, 3 e 4 e para o emissário de Itaquanduba no cenário 2, em que suas plumas se deslocam 50 m, no máximo. As concentrações variaram de 1000 a 50000 NMP/100mL para o CP nos cenários de 1 a 5 (Figura 45). Assim como mostra a Figura 44, no modelo de CP, as plumas acompanharam a direção dos ventos nos cenários 1, 2 e 3. Porém, esse acompanhamento também depende da intensidade dos ventos e, por exemplo, nos períodos antecedentes às frentes frias dos cenários 4 e 5, as plumas acompanharam a forçante baroclínica.

Figura 44: Histograma angular do deslocamento horizontal (em metros) das plumas do Araçá, Itaquanduba e Cigarras (esquerda para direita), nesta ordem, resultante do Visual Plumes para cenários 1, 2, 3, 4 e 5, nesta ordem de cima para baixo. A convenção é para onde a pluma vai. Os números em cada histograma representam a frequência (em porcentagem) do deslocamento horizontal.

Figura 45: Histograma angular da concentração de CT (em NMP/100mL) das plumas do Araçá, Itaquanduba e Cigarras (esquerda para direita), nesta ordem, resultante do Visual Plumes para cenários 1, 2, 3, 4 e 5, nesta ordem de cima para baixo. A convenção é para onde a pluma vai. Os números em cada histograma representam a frequência (em porcentagem) da concentração de CT (em NMP/100mL).

A Figura 46 e a Figura 47 mostram os histogramas angulares do deslocamento horizontal e da concentração de CT, respectivamente, na profundidade de estabilização da

pluma, referente às plumas dos emissários do Araçá, Itaquaduba e Cigarras, nos cenários reais 6, 7, 8 e 9 nesta ordem. Podemos notar os maiores deslocamentos horizontais para a pluma do Araçá em todos os cenários reais, alcançando um máximo de 125 m e deslocamentos mínimos para Cigarras de até 25 m. As concentrações para a pluma de Cigarras foram as maiores encontradas dentre os três emissários, sempre superiores à 20000 e, na maior parte do tempo, inferiores à 50000 NMP/100 mL.

O modelo de CP foi capaz de gerar os campos iniciais para o modelo de CA.

Figura 46: Histograma angular do deslocamento horizontal (em metros) das plumas do Araçá, Itaquanduba e Cigarra (esquerda para direita), nesta ordem, resultante do Visual Plumes para cenários 6, 7, 8 e 9, nesta ordem de cima para baixo. A convenção é para onde a pluma vai.

Figura 47: Histograma angular da concentração de CT (NMP/100mL) das plumas do Araçá, Itaquanduba e Cigarras, nesta ordem, resultante do campo próximo (Visual Plumes) para cenários 6, 7, 8 e 9, nesta ordem. A convenção é para onde a pluma vai.

Acoplamento de Campo Próximo e Campo Afastado

O acoplamento dos modelos de CP e de CA foi realizado afim de estudar a dispersão das plumas dos emissários no CSS. Aqui apresentamos os resultados deste modelo acoplado, com o módulo de dispersão bacteriana ativado.

Validação qualitativa do módulo de dispersão bacteriana

Para a validação qualitativa do modelo, comparamos os seus resultados com dados (Figura 18) nos pontos de praia (Figura 17). É importante notar que as melhores séries temporais de amostra de bactérias obtidas são as de enterococos fornecidas pela CETESB. Sabemos que enterococos e CT não possuem o mesmo decaimento bacteriano ao longo do tempo e por isso não respondem igualmente às condições ambientais. Entretanto, ambos são indicadores de poluição humana e podem pontuar as variabilidades da concentração e os períodos em que os valores estejam acima do limite CONAMA (Tabela 10).

É importante enfatizar que não é esperado que o modelo represente fielmente os picos de concentração máxima que são observados nos dados amostrais. Isso porque a chuva e os dados de vazão e de concentração de bactérias nos córregos não estão inclusos no modelo, os quais também são responsáveis pela poluição das praias. As chuvas lavam o continente e trazem maiores concentrações de poluentes pelos córregos que desembocam no CSS até as praias. Apesar disso, esperamos que a presença das plumas originárias dos emissários seja representada pelos períodos de baixa concentração de CT de forma adequada e que a influência dos emissários submarinos seja avaliada. Nesses períodos, o efeito dos emissários passa a ser mais importante. O nosso trabalho restringe-se exclusivamente ao efeito dos emissários das adjacências.

Dessa forma, as Figuras 48, 49, 50 e 51 apresentam a concentração de bactérias normalizada (Equação 34) para cada cenário real (Tabela 12) para a praia Preta do Norte (Figura 63). As Figuras 52, 53, 54 e 55 apresentam a concentração de bactérias normalizada para cada cenário real na praia Cigarras (Figura 63). Já as Figuras 56, 57, 58 e 59 apresentam a concentração de bactérias normalizada para cada cenário real na praia de Itaquanduba (Figura 63).

Araçá

No verão de 2012/2013 (cenário 6), para a praia Preta do Norte, o modelo detectou as variações da concentração normalizada de 0.0 até quase 0.6 entre os dias 13/01/2013 e 19/01/2013. Um aumento de quase 0.6 no dia 13/01/2013 foi percebido pelo modelo, no mesmo dia em que o dado da SABESP apresenta um máximo chegando a 1.0 na concentração normalizada (Figura 48). Entre os dias 21/01/2013 e 18/02/2013, o modelo apresentou maiores variabilidades na concentração normalizada do que no restante da simulação. O aumento nos valores de concentração normalizada nos dias 28/01/2013 para 0.6, 03/02/2013 para 0.15 (aproximadamente) e 16/02/2013 para 0.15 (aproximadamente) foi parecido entre os dados e o modelo. Seis eventos de baixa concentração registradas pela CETESB foram bem representadas pelo modelo nos dias: 9/12/2012, 23/12/2012, 30/12/2012, 10/02/2013, 17/02/2013 e 24/02/2013.

Figura 48: Série temporal da concentração normalizada de entre 0 e 1 de CT resultante do modelo (linha contínua em azul) e dos dados (em vermelho) para o ponto de grade da praia Preta do Norte para o cenário 6 (verão 2013) e dados . As cores da figura seguem a legenda da Figura 18.

No inverno de 2013 (cenário 7) (Figura 49), as altas concentrações normalizadas nas amostras em 30/06/2013 e 15/07/2013 não foram representadas no modelo. O modelo representou concentrações registradas pela CETESB abaixo do limite CONAMA, sendo eles em 5 ocasiões: 23/06/2013, 28/07/2013, 11/08/2013, 18/08/2013 e 25/08/2013. O pico na concentração de enterococos do dia 30/06/2013 é capturado pelo modelo de forma

mais suavizada, aumentando em até 0.75 (aproximadamente), enquanto que o dado alcançou concentração normalizada máxima (1.0). A concentração normalizada no dado de quase 0.2 em 21/07/2013 é registrada qualitativamente bem pelo modelo.

Figura 49: Idem a Figura 48 para o cenário 7 (inverno 2013). As cores da figura seguem a legenda da Figura 18.

Para o verão de 2015/2016 (cenário 8), o modelo representou adequadamente a concentração normalizada máxima de 1.0 registrada no dado da SABESP no dia 03/12/2015 (Figura 50). No dia 06/12/2015, a concentração foi no limite de não-deteção do método e o modelo foi capaz de reproduzi-la. Os pequenos aumentos nas observações para concentração normalizada de 0.2 nos dias 13/12/2015 e 03/01/2016 foram bem detectados pelo modelo. A baixa concentração normalizada da amostra de quase 0.0 do dia 24/01/2016 foi registrada qualitativamente bem pelo modelo. As concentrações normalizadas medidas pela SABESP e CETESB no dia 19/02/2016, não são bem representadas no modelo no verão de 2016 na praia Preta do Norte (Figura 50).

Figura 50: Idem a Figura 48 para o cenário 8 (verão 2016). As cores da figura seguem a legenda da Figura 18.

O inverno de 2016 (cenário 9), é a simulação que apresenta as maiores variabilidades e os maiores valores de concentração normalizada de CT, sendo o período mais poluído para a praia Preta do Norte dentre os cenários (Figura 51). O dia 20/08/2016 foi bastante estudado recentemente devido às consequências da ação combinada dos ventos e das marés que causaram grandes ressacas no litoral sul e sudeste brasileiro. Os fortes ventos do período e o aumento do nível do mar dentro do CSS em aproximadamente 1930 h após o início do cenário 9 (correspondente a 20/08/2016) (Figura 76) são indicativos da passagem deste evento extremo. Assim, no dia 20/08/2016, observa-se uma concentração máxima normalizada de enterococos medido pela CETESB de 1.0, que está provavelmente associada à este evento. Como já dito anteriormente, o modelo considera os emissários submarinos como fontes poluidoras exclusivas e por isso tal aumento na concentração normalizada não foi encontrado no modelo. Comparativamente aos cenários 6, 7 e 8, no cenário 9, o modelo representou qualitativamente bem as baixas concentrações (quase 0.0) normalizadas registradas nos dados dos dias 12/06/2016, 19/06/2016, 03/07/2016 e 07/08/2016.

Figura 51: Idem a Figura 48 para o cenário 9 (inverno 2016). As cores da figura seguem a legenda da Figura 18.

Cigarras

No verão de 2013, para a praia de Cigarras (Figura 52), o modelo reproduziu qualitativamente bem a alta concentração normalizada de 1.0 registrada em 10/12/2012 nas observações de CT da SABESP. Períodos de concentração baixa (próximas a 0.0) foram bem representados para a praia de Cigarras nos dias: 16/12/2012, 23/12/2012, 30/12/2012, 10/02/2013, 17/02/2013 e 24/02/2013. Já as concentrações normalizadas máximas de 1.0 em 20/01/2013 e 22/01/2013 não foram bem reproduzidas no modelo.

Figura 52: Série temporal da concentração normalizada de 0 a 1 de CT resultante do modelo (linha contínua em azul) e dos dados (em preto) para o ponto de grade da praia das Cigarras para o cenário 6 (verão 2013). As cores da figura seguem a legenda da Figura 18.

No inverno de 2013 para Cigarras (Figura 53), o modelo reproduziu as concentrações normalizadas próximas a 0.0 dos dados nos dias: 02/06/2013, 23/06/2013 e 28/07/2013. Já a concentração normalizada de 1.0 medida pela CETESB no dia 30/06/2013 não foi bem reproduzida.

Figura 53: Idem a Figura 52 para o cenário 7 (inverno 2013). As cores da figura seguem a legenda da Figura 18.

No verão de 2015/2016 (Figura 54), o modelo representou bem a concentração

normalizada de 0.0 (limite de não-detecção) registrada em 21/02/2016. Já o valor máximo da concentração normalizado de 1.0 medido pela CETESB no dia 07/02/2016 não foi bem reproduzido pelo modelo.

Figura 54: Idem a Figura 52 para o cenário 8 (verão 2016). As cores da figura seguem a legenda da Figura 18.

No inverno de 2016 (Figura 55), o modelo representa qualitativamente bem a concentração normalizada com valor 1.0 do dado em 21/08/2016. O modelo também reproduz qualitativamente bem as concentrações normalizadas nos dias 05/06/2016 e 17/07/2016, com valores de 0.45 e 0.35, respectivamente.

Figura 55: Idem a Figura 52 para o cenário 9 (inverno 2016). As cores da figura seguem a legenda da Figura 18.

Itaquanduba

No verão de 2012/2013, para a praia de Itaquanduba (Figura 56), o modelo reproduziu as baixas concentrações normalizadas (próximas a 0.0) registradas de CT nos dias 09/12/2012, 06/01/2013, 19/01/2013, 20/01/2013 e 01/02/2013. Ele também representou qualitativamente bem as concentrações normalizadas registradas nas observações em: 12/12/2013 de 0.1, 30/12/2013 de 0.15 (aproximadamente), 13/01/2013 de 0.18 (aproximadamente), 26/01/2013 de 0.25 (aproximadamente), 10/02/2013 de 0.3 (aproximadamente), e, 17/02/2013 e 22/02/2013 com valor de 0.15. Os valores máximos de concentração normalizada de CT da CETESB em 16/12/2013 e da SABESP em 08/01/2013, não foram bem reproduzidos pelo modelo, que apresentou máximos de concentração com antecedência de alguns dias em relação a esses dados.

Figura 56: Série temporal da concentração normalizada de 0 a 1 de CT resultante do modelo (linha contínua em azul) e dos dados (em preto) para o ponto de grade da praia de Itaquanduba para o cenário 6 (verão 2013). As cores da figura seguem a legenda da Figura 18.

No inverno de 2013 (Figura 57), as concentrações normalizadas mínimas próximas a 0.0 registradas nos dados em 07/07/2013 e 21/07/2013 foram reproduzidas qualitativamente bem pelo modelo. Nos dias 09/06/2013, 23/06/2013, 13/07/2013, 28/07/2013, 04/08/2013, 11/08/2013, 18/08/2013 e 25/08/2013 as concentrações normalizadas foram entre 0.1 e 0.18 nas observações e foram bem representadas pelo modelo. O valor máximo de concentração normalizada de CT observado no dado CETESB em 30/06/2013 não foi reproduzido pelo modelo, assim como na praia de Cigarras.

Figura 57: Idem a Figura 56 para o cenário 7 (inverno 2013). As cores da figura seguem a legenda da Figura 18.

No verão de 2015/2016 (Figura 58) o modelo reproduziu qualitativamente as concentrações normalizadas dos dados próximos de 0.0 em 14/02/2016 e 28/02/2016. Além disso, o modelo representou satisfatoriamente os valores de concentração normalizada em 06/12/2015, 13/12/2015 e 27/12/2015 de aproximadamente 0.8, em 18/01/2016 com valor de 0.2 (aproximadamente), em 01/02/2016 com valor de 0.15 e 21/02/2016 com 0.1 (aproximadamente) de concentração. O valor de 1.0 na concentração normalizada do dado não foi detectada pelo modelo no dia 10/01/2016.

Figura 58: Idem a Figura 56 para o cenário 8 (verão 2016). As cores da figura seguem a legenda da Figura 18.

No inverno de 2016 (Figura 59), o modelo reproduziu qualitativamente bem as variabilidades das concentrações normalizadas nos dias: 05/06/2016, 12/06/2016, 19/06/2016, 10/07/2016, 31/07/2016, 07/08/2016 e 28/08/2016. Na praia de Itaquanduba, o modelo detectou um período de concentrações normalizadas elevadas de 03/08/2016 a 20/08/2016 em relação ao tempo total da simulação. O valor máximo de 1.0 na concentração normalizada do dado em 21/08/2016 não é reproduzido pelo modelo, assim como na praia Preta do Norte (Figura 51).

Figura 59: Idem a Figura 56 para o cenário 9 (inverno 2016). As cores da figura seguem a legenda da Figura 18.

O evento extremo ocorrido no dia 21/08/2016 causou a detecção de uma concentração de enterococos elevada pela CETESB neste dia, para os três pontos de praias avaliados. Entretanto, esse evento não causou grandes variações nos resultados de CT do modelo pois a chuva não foi contabilizada no modelo. Além disso, os pontos de praia na grade do modelo não correspondem exatamente aos pontos amostrais da CETESB.

As simulações de inverno apresentaram concentrações normalizadas mais altas do que as simulações de verão, para os três pontos de praia analisados. Embora não haja correspondência em alguns cenários entre os dados e o modelo, principalmente de quando há concentrações normalizadas com valores iguais ou próximos a 1.0, o sECOM registrou o aumento nos valores de concentração de CT.

Método de Wen et al. (2017)

As Figuras 60, 61 e 62 apresentam os correlogramas entre concentrações de enterococos observadas e concentração de CT resultantes das simulações dos cenários reais, para as praias Preta do Norte, Cigarras e Itaquanduba, respectivamente. Dentre as 3 praias, os resultados do modelo, no ponto de grade da praia Preta do Norte, são os mais próximos das observações pois, foram se ajustaram a reta de intersecção entre os dados e modelo (Figura 60). Os coeficientes de variação (CV) foram de 2.42 para praia Preta do Norte e 2.45 para as praias Itaquanduba e Cigarras, mostrando uma variabilidade alta entre os dados e modelo. Os valores obtidos de CV são similares ao valor de 3.9 encontrado para as adjacências do porto de Nova York (Wen et al. 2017). Além disso, o modelo, por vezes, superestima os dados da praia Preta do Norte e em outras vezes, subestima-os. Já para os pontos de praia em Itaquanduba e Cigarras, o modelo, na maior parte dos casos, subestimou as concentrações de bactérias.

As concentrações podem ser subestimadas nos pontos fonte de CT (Dorner et al. 2006) devido ao uso de uma abordagem de célula de mistura (Equação 30 e Figura 16), usada também por Dorner et al. (2006) e Gregorio (2009), fato que foi observado nas concentrações de CT dos emissários de Itaquanduba e, principalmente, em Cigarras. Podemos observar, também, que as concentrações do modelo não ultrapassaram 10^3 NMP/100mL na praia Preta do Norte, 10^1 NMP/100mL na praia de Cigarras e 10^2 NMP/100mL na praia de Itaquanduba. Nos dados, a ordem de grandeza máxima é de 10^3 NMP/100mL para as três praias. Isso evidencia novamente as concentrações de CT do modelo sendo subestimadas, principalmente nas praias de Itaquanduba e Cigarras. Na realidade, existem outras fontes de bactérias, que não entraram no escopo desse trabalho, que podem aumentar as concentrações de CT. De acordo com Wen et al. (2017), o valor de 0.8, na Equação 33, utilizado por (Mancini 1978) pode ser um pouco alto para representar o decaimento bacteriano de CT. Esse também pode ser um dos motivos que justifique as baixas concentrações de CT no modelo em relação às observações.

Figura 60: Correlograma entre as concentrações de CT das simulações do modelo sE-COM dos cenários 6, 7, 8 e 9 (cenários reais) e as observações de enterococos da CETESB com correção proposta por Wen et al. (2017) para o ponto de grade da praia Preta do Norte, próxima ao emissário do Araçá.

Figura 61: Idem a Figura 60 para o ponto de grade da praia das Cigarras.

Figura 62: Idem a Figura 60 para o ponto de grade da praia Itaquanduba.

Setores

Esta seção apresenta os resultados do modelo acoplado, com o CSS dividido em 10 setores, conforme a Figura 63.

Figura 63: O CSS dividido em 10 setores para a avaliação dos resultados do modelo acoplado. As estrelas indicam os pontos de grade onde os emissários estão localizados e as bolas de cor magenta indicam os pontos monitorados pela CETESB, onde há coleta semanal. As radiais, em amarelo, alinhadas à posição de cada emissário, indicam onde foram realizadas as seções verticais de concentração de CT para o cenário 4.

As Tabelas 25, 26 e 27 apresentam a concentração máxima e as Tabelas 28, 29 e 30 apresentam o desvio padrão encontrados para cada setor, em cada cenário proposto. A média geométrica (MG) das concentrações para cada setor das simulações foi sempre próximo a 1.0 NMP/100mL e a concentração mínima de CT encontrada foi próxima de 0 NMP/100mL em todas as simulações. Devido à isso, não mostramos tabela com esses valores. A MG foi calculada apenas para fins qualitativos e está demonstrada para cada simulação nas Figuras 64 a 76 e não possui significado quantitativo para este trabalho. Cabe ressaltar que esta análise foi feita para avaliar, qualitativamente, como o sistema

hidrodinâmico afeta a movimentação horizontal das plumas entre os setores do CSS ao longo do tempo.

A partir das Tabelas 25, 26 e 27, podemos concluir que o setor com as maiores concentrações registradas pelo modelo foi o 2a, para todos os cenários propostos neste trabalho, local onde se encontra a praia Preta do Norte, próximo ao emissário do Araçá. Em seguida do setor 2a, o setor 3a foi o que apresentou as maiores concentrações de CT, para todos os cenários propostos. Já nos cenários idealizados (1, 2, 3, 4 e 5), 2a e 3a são os mais impactados, seguidos por 4a, 3b, 4b, 2b, 1b, 1a, 5a e 5b, do setor com maiores concentrações para os de menores concentrações de CT nas simulações (Tabela 25).

Tabela 25: Concentração máxima de CT (100 NMP/100mL) na coluna de água durante toda a simulação, para cada setor, em para cada cenário ideal (1, 2, 3, 4 e 5).

Setores	Cenários idealizados				
	1	2	3	4	5
1a	0.0	49.3	0.0	25.9	24.3
1b	0.0	57.7	0.0	25.2	24.4
2a	1057.5	1851.8	502.4	814.9	838.2
2b	10.1	181.1	27.6	228.1	210.3
3a	714.5	592.7	256.8	355.9	326.4
3b	262.8	212.3	118.0	120.4	101.0
4a	297.6	76.5	112.9	94.8	97.1
4b	145.0	194.7	72.3	130.9	119.8
5a	17.7	13.9	24.9	33.9	28.2
5b	5.6	0.0	0.0	11.3	5.6

Para os cenários reais, nos setores 2a e 3a, foram encontradas as maiores concentrações máximas de CT e a ordem dos setores subsequentes depende de cada um dos cenários, conforme discretizado nas Tabelas 26 e 27).

Tabela 26: Concentração máxima de CT (NMP/100mL) na coluna de água durante toda a simulação, para cada setor, para os cenários 6 (verão de 2013) e 8 (verão de 2016).

Setores	Cenários reais de verão					
	6.1	6.2	6.3	8.1	8.2	8.3
1a	122.4	91.7	98.1	186.5	73.4	98.1
1b	93.2	70.7	62.0	99.8	33.9	100.6
2a	1189.4	1785.4	1583.9	1249.5	975.7	1328.9
2b	188.5	277.6	222.0	328.1	232.1	205.4
3a	349.3	902.3	286.9	341.8	341.4	320.0
3b	146.0	256.1	122.4	148.5	131.4	130.0
4a	134.7	79.5	117.4	139.6	118.1	139.0
4b	185.7	244.5	162.2	154.1	169.5	230.7
5a	22.6	21.2	22.6	20.9	19.7	19.2
5b	12.7	5.6	7.6	5.6	5.6	5.6

Tabela 27: Idem à Tabela 26 para os cenários 7 (inverno de 2013) e 8 (inverno de 2016).

Setores	Cenários reais de inverno					
	7.1	7.2	7.3	9.1	9.2	9.3
1a	151.7	141.2	79.0	101.6	109.3	122.2
1b	56.5	56.0	22.6	44.4	53.1	39.4
2a	2670.7	1792.5	2155.4	2579.9	1714.8	1737.4
2b	317.4	295.3	347.3	395.4	355.9	362.9
3a	671.1	739.8	748.7	913.0	667.9	725.2
3b	211.7	255.6	142.7	288.4	215.5	235.8
4a	220.1	247.4	174.7	247.8	230.3	150.3
4b	429.1	407.4	360.1	371.6	429.0	377.8
5a	28.2	61.5	43.8	50.8	23.8	22.6
5b	5.6	16.9	5.6	11.3	5.6	5.6

Os maiores desvios padrão nas concentrações de CT são nos setores 2a e 3a tanto para os cenários idealizados de 1 a 5 (Tabela 28) quanto nos cenários reais de 6 a 9 (Tabelas 29 e 30). Os desvios padrão para os cenários de inverno (7 e 9) foram maiores do que para os cenários de verão (6 e 8). Para o setor 2a, no verão, o valor mínimo foi de 8.5 NMP/100mL em janeiro de 2016 e o máximo foi de 10.6 NMP/100mL em janeiro de 2013. Já no inverno, o desvio padrão mínimo foi de 13.5 NMP/100mL em julho de 2013 e o máximo foi de 18.2 NMP/100mL em julho de 2016.

Tabela 28: Desvio padrão da concentração de CT em NMP/100mL encontrada para os setores no CSS para cada cenário idealizado (1, 2, 3, 4 e 5).

Desvio padrão - Cenários idealizados					
Setores	1	2	3	4	5
1a	0.0	0.8	0.0	0.2	0.2
1b	0.0	1.2	0.0	0.2	0.2
2a	6.6	12.0	6.0	10.4	9.4
2b	0.1	3.4	0.1	1.7	1.6
3a	8.0	3.9	8.2	6.5	6.7
3b	2.4	1.7	2.9	2.4	2.3
4a	3.0	0.6	3.3	2.1	1.8
4b	1.4	1.0	1.4	1.8	1.7
5a	0.3	0.1	0.3	0.3	0.3
5b	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0

Tabela 29: Desvio padrão da concentração de CT em NMP/100mL encontrada para os setores no CSS em cada simulação durante o verão de 2013 e de 2016 (cenários 6 e 8, respectivamente).

Desvio padrão - Cenários reais de verão						
Setores	6.1	6.2	6.3	8.1	8.2	8.3
1a	1.0	1.1	1.0	1.3	0.8	0.7
1b	0.7	0.6	0.6	0.8	0.4	0.7
2a	8.6	10.6	9.5	9.4	8.5	9.8
2b	2.0	2.3	1.8	2.3	2.2	2.4
3a	5.2	5.2	5.2	4.9	4.8	5.0
3b	2.1	1.9	2.3	1.8	1.8	2.0
4a	2.4	1.6	2.0	2.0	2.0	2.0
4b	1.6	1.5	1.6	1.3	1.4	1.6
5a	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2
5b	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabela 30: Idem à Tabela 29 para as simulações de inverno de 2013 e de 2016 (cenários 7 e 9, respectivamente).

Cenários reais de inverno						
Setores	7.1	7.2	7.3	9.1	9.2	9.3
1a	2.1	1.9	1.3	1.3	1.2	1.6
1b	0.5	0.5	0.3	0.3	0.4	0.4
2a	17.4	13.5	14.2	16.4	18.2	15.2
2b	3.4	3.5	3.2	3.2	4.5	3.8
3a	10.0	6.7	6.4	11.6	8.0	6.7
3b	3.3	2.4	2.1	3.9	2.9	2.3
4a	3.6	3.4	2.4	5.0	2.8	2.4
4b	3.3	2.6	2.4	3.4	3.2	2.8
5a	0.4	0.5	0.3	0.5	0.3	0.4
5b	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1

Na Figura 64, podemos observar um pico anômalo no início da simulação para a concentração no setor 2a no qual a praia Preta do Norte se encontra e do qual o emissário do Araçá se aproxima. Este pico é explicado pela alta concentração estimada no CP (Figura 35) o qual foi colocado como condição inicial no modelo de CA. O modelo foi bastante sensível as concentrações iniciais impostas, como observado no modelo de Dorner et al. (2006). Ainda no cenário 1, podemos notar que as maiores MG foram encontradas nos setores 4a, 3a e 4b, nessa ordem e, as maiores concentrações máximas de CT foram nos setores 2a e 3a, com um instante do tempo em que a concentração atinge 1000 NMP/100mL, no início da simulação.

Figura 64: Painel superior: média geométrica e painel inferior: valores máximos da concentração de CT (NMP/100mL) encontrados para cada setor (legenda) na coluna de água, durante a simulação do cenário 1. Tempo total de 480 horas de simulação ou 20 dias. A legenda indica os 10 setores avaliados (Figura 63).

No cenário 2 (Figura 65), as maiores MG foram encontradas nos setores 4a, 3a e 4b, ao norte do emissário do Araçá, devido ao vento constante de sudoeste, que movimenta a pluma para norte. As maiores concentrações máximas de CT foram no setor 2a, seguido do setor 3a, 4a e 4b. Nenhum instante do tempo possui concentração acima do limite CONAMA de 1000 NMP/100mL.

Figura 65: Painel superior: Vento constante de sudoeste(m.s^{-1}) utilizado no CSS no cenário 2; painel central: média geométrica e painel inferior: valores máximos da concentração de CT (NMP/100mL) encontrados para cada setor (legenda) na coluna de água, durante a simulação do cenário 2. Tempo total de 480 horas de simulação ou 20 dias. A legenda indica os 10 setores avaliados (Figura 63).

No cenário 3 (Figura 66), podemos notar que as maiores MG de CT foram encontradas nos setores 3b e 3a, inicialmente. A partir de 95 h, 2a e 2b apresentam as maiores MG de concentração, mostrando que, nem sempre, o vento de nordeste sobrepõe-se a forçante termohalina. As maiores concentrações máximas foram no setor 2a, em um instante do tempo com concentração de CT atingindo 1800 NMP/100mL no início da simulação.

Figura 66: Painel superior: Vento constante de nordeste (m.s^{-1}) utilizado no cenário 3 no CSS; painel central: média geométrica e painel inferior: valores máximos da concentração de CT (NMP/100mL) encontrados para cada setor (legenda) na coluna de água, durante a simulação do cenário 3. Tempo total de 480 horas de simulação ou 20 dias. A legenda indica os 10 setores avaliados (Figura 63).

No cenário 4 (Figura 67), antes da passagem da frente fria, as maiores MG de CT foram encontradas nos setores 3a, 4b e 3b, localizados ao norte do emissário do Araçá, pois o vento constante de nordeste (de 3 m.s^{-1}) antecedente a passagem da frente fria, não foi intenso o suficiente para movimentar a pluma para sul. A forçante termohalina é majoritária, sobrepondo-se à ação dos ventos nesse momento. Com a passagem da frente,

o setor 4a recebe uma carga de poluição proveniente da pluma do Araçá que acompanha a direção do vento que sopra de sudoeste e, portanto, desloca a pluma para nordeste no CSS. Em sequência, após a passagem da frente, existe a inversão dos ventos que tornam a soprar de nordeste, fazendo com que a pluma se expanda para sudoeste, poluindo então os setores 2a e 2b (ao sul do emissário do Araçá). Porém, rapidamente a forçante termohalina passa a ser majoritária em relação ao vento, fazendo com que os setores mais poluídos não sejam mais 2a e 2b, mas sim os setores 3a e 4b. As maiores concentrações máximas foram no setor 2a, com máximo de 800 NMP/100mL, com um grande declínio durante a passagem da frente fria quando a pluma se desloca para setores ao norte e a dispersão é maior, distribuindo as concentrações de CT em uma maior região do CSS. Concentrações acima de 300 NMP/100mL foram encontradas para o setor 3a e concentrações de até 100 NMP/100mL, para o setor 4a. Em nenhum momento observou-se concentração acima do limite CONAMA, de 1000 NMP/100mL em 20% do tempo ou em cinco momentos consecutivos.

As concentrações de CT são apresentadas para o cenário 4 através da seleção de seis momentos durante a simulação (Figura 68), afim de mostrar a passagem da frente fria: 123 h, a 171 h, 174 h, 177 h, 192 h e 246 h após o início da simulação. A entrada da frente fria pode ser detectada em 171 h na Figura 68.

Figura 67: O painel superior apresenta a elevação da superfície do mar (m) ao longo do tempo, o segundo painel, o vento médio (m.s^{-1}) utilizado no CSS, o terceiro, a média geométrica (NMP/100mL) da concentração de CT em cada setor na coluna de água (vide legenda, Figura 63) e, o painel inferior, apresenta os valores máximos da concentração de CT (NMP/100mL) encontrados para cada setor (legenda) na coluna de água, durante a simulação do cenário 4. Tempo total de 480 horas de simulação ou 20 dias. A legenda indica os 10 setores da Figura 63.

Para o cenário 4, avaliamos também como as plumas dos emissários se compor-

Figura 68: Concentração de CT (NMP/100mL), indicada pela legenda no canto superior esquerdo de cada figura, nos instantes de tempo em 123 h, 171 h, 174 h, 177 h, 192 h e 246 h após o início da simulação do cenário 4. Observa-se a dispersão da pluma de CT pela ação conjunta dos ventos e da forçante termohalina antes, durante e após a passagem de uma frente fria. As cores indicam a dispersão horizontal da concentração de CT (NMP/100mL) integrada na profundidade no CSS.

tam em profundidade com a passagem de frente fria. Para isso, selecionamos 3 seções verticais representadas pelas linhas em amarelo na Figura 63. Os locais para avaliar as seções foram escolhidos de forma a incluir a localização dos emissários do CSS antes, durante e após a passagem da frente fria idealizada no cenário 4.

As Figuras 69, 70 e 71 apresentam 3 diferentes instantes de tempo na posição das 3 radiais alinhadas aos três emissários (radiais em amarelo da Figura 63). Os instantes de tempo selecionados foram: 270 hs, 288 hs e 312 hs em relação ao início da simulação do cenário 4 e as plumas dos emissários puderam ser observadas verticalmente na coluna de água.

Para a pluma do emissário do Araçá (Figura 69), 18 horas antes da passagem da frente fria, em 270 hs, os ventos de nordeste favoreceram para que a pluma fosse encontrada próxima ao continente. Durante a passagem da frente, em 288 hs, a pluma se estendeu para nordeste e, por conta disso, a sua concentração ficou bastante reduzida devido à maior dispersão horizontal e vertical da pluma. Após 24h da passagem da frente fria, em 312 hs, foi possível notar o aumento da concentração da pluma do Araçá na seção vertical, acompanhando a mudança na direção dos ventos. A pluma do emissário do Araçá durante esses instantes, ficou majoritariamente em subsuperfície.

Para a pluma do emissário de Cigarras (Figura 70), 18 horas antes da passagem da frente fria, em 270 hs, os ventos de nordeste favoreceram para que a pluma, assim como no Araçá, fosse encontrada próxima ao continente. Durante a passagem da frente, em 288 hs, a pluma se espalha na direção da Ilha de São Sebastião e para nordeste e, por conta disso, a sua estrutura vertical na radial é alongada e se espalha com as plumas de Itaquanduba e do Araçá. Após 24h da passagem da frente fria, em 312 hs, é possível notar a presença da pluma de Cigarras próximo ao continente acompanhando a direção dos ventos, com um maior espalhamento vertical do que em 270 hs. A pluma de Cigarras foi identificada na superfície antes, durante e depois da frente fria. Apesar da concentração inicial no modelo de CP no emissário das Cigarras ser maior do que a dos outros emissários (Tabela 18) e, das altas concentrações nas simulações de CP para a pluma de Cigarras (Figuras 40, 41, 42 e 43 e Tabela 21), esta pluma apresentou concentrações inferiores à 1.0 NMP/100mL (Figura 70) na coluna de água. Isso ocorreu devido a provavelmente três fatores principais: 1) a vazão do emissário de Cigarras ($0.0116 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) no modelo de CP é uma ordem de grandeza menor do que a vazão dos emissários do Araçá ($0.14 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e

de Itaquanduba ($0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) (Tabela 18). 2) O modelo de CP mostrou que, na maioria nos cenários, a pluma de Cigarras possuía diâmetro inferior às plumas dos outros emissários, inclusive no cenário 4 (Figura 29). 3) O tamanho da célula da grade do CA era maior na região de Cigarras do que na região central do CSS (no Araçá e Itaquanduba). Juntando isso ao fato da pluma de Cigarras também ser pequena, a diluição feita do CP para o CA neste ponto de grade foi maior, para que se mantesse a conservação de massa (Figura 16). No ponto do emissário de Cigarras, foram encontradas as menores concentrações no CA, mesmo este emissário apresentando as maiores concentrações no CP. Juntando isso ao fato da pluma desse emissário apresentar os menores diâmetros e menores dispersões no CA, a transformação das concentrações para a célula de mistura do CA, provavelmente, causou uma alta diluição da pluma. Portanto, o fato de apresentar baixas concentrações ao final do modelo acoplado, não significa necessariamente, que esta região esteja livre da poluição proveniente do emissário.

A Figura 71 apresenta os instantes de tempo na radial alinhada ao emissário de Itaquanduba. Foi possível localizar a pluma do emissário de Itaquanduba próxima a Ilha de São Sebastião e a pluma do emissário do Araçá do lado continental do CSS. Dezoito horas antes da passagem da frente fria, em 270 hs, os ventos de nordeste favoreceram para que a pluma de Itaquanduba ficasse próxima a costa da Ilha de São Sebastião, em subsuperfície. Durante a passagem da frente, em 288 hs, essa pluma foi espalhada na direção nordeste, seguindo a direção dos ventos de sudoeste, apresentando um maior espalhamento vertical, sendo observada em superfície com concentrações bastante baixas próximas (Figura 71). Após 24h da passagem da frente fria, em 312 hs, não foi observada a presença da pluma do Araçá próxima ao continente e a pluma de Itaquanduba acompanhou a direção dos ventos, apresentando uma maior dispersão na vertical e menores concentrações de CT. A pluma de Itaquanduba foi observada em superfície durante e depois da frente fria, mas não antes da passagem mesma.

Figura 69: Seção vertical para a radial, transversal ao canal, alinhada ao emissário do Araçá (Figura 63) na grade do modelo, localizada próximo a latitude de 23.82°S.

Figura 70: Seção vertical para a radial, transversal ao canal, alinhada ao emissário de Cigarras (Figura 63), localizada próximo a latitude de 23.74°S.

Figura 71: Seção vertical para a radial, transversal ao canal, alinhada ao emissário de Itaquanduba, localizada próxima a latitude de 23.80°S.

O cenário 5 (Figura 72) se diferencia do cenário 4 (Figura 67) por não incluir a forçante da maré. Podemos notar que antes da passagem de frente as maiores médias geométricas para a concentração de CT foram encontradas nos setores 3a, 4b e 3b. Os ventos de nordeste porém, foram bastante fracos e a forçante termohalina sobrepôs-se à ação dos ventos. Com a passagem da frente, o setor 4a recebeu uma carga de poluição proveniente da pluma do Araçá que acompanhou a direção dos ventos de sudoeste e, portanto, deslocou-se para nordeste no CSS. Em sequência, após a passagem da frente,

houve uma inversão dos ventos, que voltaram a soprar de nordeste, fazendo com que a pluma se deslocasse para sudoeste, poluindo então, os setores 2a e 2b (ao sul do emissário do Araçá). Porém, logo a forçante termohalina sobrepõe-se aos ventos novamente, e os setores mais poluídos não são mais 2a e 2b, mas sim 3a e 4b. As maiores concentrações máximas na série temporal foram no setor 2a, com máximo de 810 NMP/100mL, com um grande declínio durante a passagem da frente fria quando a pluma se deslocou para setores ao norte e se espalhou no canal. Concentrações acima de 300 NMP/100mL foram encontradas para o setor 3a e de até 100 NMP/100mL para o setor 4a. Nenhum instante do tempo apresentou concentração de CT acima do limite CONAMA de 1000 NMP/100mL. Podemos concluir que, antes da passagem da frente fria, o efeito da maré no cenário 4 (Figura 67) contribuiu para maiores concentrações máximas de CT ao longo do tempo no setor 2a, as quais alcançaram aproximadamente 690 NMP/100mL, antes da passagem da primeira frente e 720 NMP/100mL, antes da passagem da segunda frente fria. Já no cenário 5 (Figura 72), sem influência da maré, nos mesmos instantes de tempo que o cenário 4, apresentou concentrações de CT de, no máximo, 450 NMP/100mL e 580 NMP/100mL, respectivamente.

Figura 72: O painel superior apresenta a elevação da superfície do mar (m) ao longo do tempo, o segundo painel, o vento médio (m.s^{-1}) utilizado no CSS, o terceiro, a média geométrica (NMP/100mL) da concentração de CT em cada setor na coluna de água (vide legenda, Figura 63) e, o painel inferior, apresenta os valores máximos da concentração de CT (NMP/100mL) encontrados para cada setor (legenda) na coluna de água, durante a simulação do cenário 5. Tempo total de 480 horas de simulação ou 20 dias. A legenda indica os 10 setores da Figura 63.

Para o cenário 6 (Figura 73), no verão de 2013, ocorreram diversas passagens

de frentes frias, detectadas pela inversão dos ventos de nordeste para ventos de sudoeste. Em períodos em que houve o predomínio de ventos de nordeste, de leste ou de sudeste, a pluma do emissário do Araçá concentrou-se no setor 2a. A passagem de frente fria fez com que a pluma do Araçá perdurasse por mais tempo no setor 4a, o que pode ser observado na variação da média geométrica ao longo do tempo na simulação. Além disso, passagens de frentes frias causaram declínio nos valores de concentração de CT no setor 2a pois a pluma se deslocou na direção norte/nordeste, dispersando e diluindo horizontalmente a pluma. As maiores concentrações máximas de CT foram obtidas no setor 2a quando os ventos eram de nordeste e com intensidade superior ou igual a 4 m.s^{-1} . Por exemplo, entre 1250 hs e 1300 hs, os ventos de nordeste alcançaram intensidade de até 7 m.s^{-1} , alcançando, no setor 2a, concentrações de CT de 1800 NMP/100mL em 1250 hs (Figura 73. Nesse cenário, houve 5 situações em que a concentração de CT foi superior a 1000 NMP/100mL.

Figura 73: O painel superior apresenta a elevação da superfície do mar (m) ao longo do tempo, o segundo painel, o vento médio (m.s^{-1}) utilizado no CSS, o terceiro, a média geométrica (NMP/100mL) da concentração de CT em cada setor na coluna de água (vide legenda, Figura 63) e, o painel inferior, apresenta os valores máximos da concentração de CT (NMP/100mL) encontrados para cada setor (legenda) na coluna de água, durante a simulação do cenário 6. Tempo total de 2160 hs ou 90 dias, pois apresenta sequencialmente os meses (30 dias ou 720 hs) de simulação: dezembro, janeiro e fevereiro. A legenda indica os 10 setores da Figura 63.

Para o cenário 8 (Figura 74), no verão de 2016, podemos observar que as elevações do nível do mar registradas foram menores que no cenário 6 pois a quantidade e a intensidade das frentes frias no cenário 8 foram menores. Dois períodos de ventos de sudeste e leste intensos contribuíram para o aumento da concentração máxima no setor 2a nos instantes de tempo de 50 hs (1210 NMP/100mL) e 2150 hs (1300 NMP/100mL). A passagem de frente fria fez com que a pluma do Araçá perdurasse por mais tempo no setor 4a, o que pode ser observado na variação da média geométrica ao longo do tempo. Além disso, passagens de frentes frias fizeram com que a concentração de CT no setor 2a diminuísse, assim como no cenário 6. Neste cenário, houve apenas 2 situações em que as concentrações de CT foram superiores a 1000 NMP/100mL: em 70 hs com concentração de 1200 NMP/100mL e em 2250 hs com concentração de 1300 NMP/100mL.

Comparativamente, houve 5 situações no verão de 2013 e 2 situações no verão de 2016, em que as concentrações de CT foram superiores a 1000 NMP/100mL no setor 2a. Ou seja, em questão de concentrações máximas, durante o verão de 2013, a região do Araçá apresentou um cenário relativamente pior ao ano de 2016, assim como observado nos dados da praia Preta do Norte (Figura 18).

Figura 74: O painel superior apresenta a elevação da superfície do mar (m) ao longo do tempo, o segundo painel, o vento médio (m.s^{-1}) utilizado no CSS, o terceiro, a média geométrica (NMP/100mL) da concentração de CT em cada setor na coluna de água (vide legenda, Figura 63) e, o painel inferior, apresenta os valores máximos da concentração de CT (NMP/100mL) encontrados para cada setor (legenda) na coluna de água, durante a simulação do cenário 8. Tempo total de 2160 hs ou 90 dias, pois apresenta sequencialmente os meses (30 dias ou 720 hs) de simulação: dezembro, janeiro e fevereiro. A legenda indica os 10 setores da Figura 63.

Para os cenários 7 (Figura 75) e 9 (Figura 76), de inverno de 2013 e de 2016, respectivamente, um maior número de entrada de frentes frias em relação aos cenários de verão (6 e 8) puderam ser detectadas. Na presença da passagem de frente fria, as médias geométricas de concentração de CT do setor 4a aumentaram e perduraram por mais horas (com duração de 150 hs a 200 hs) como por exemplo, no cenário 7, entre 1200 hs e 1400 hs de simulação e entre 1650 hs e 1800 hs de simulação. Da mesma forma isto foi encontrado entre 100 hs e 250 hs e de 400 hs a 600 hs, para o cenário 9. Para as concentrações máximas de CT, os maiores valores foram encontrados no setor 2a, em ocasiões em que o vento soprava de leste e de nordeste na direção do continente. No cenário 7, em 36 ocasiões, as concentrações máximas no setor 2a foram superiores a 1000 NMP/100mL. No cenário 9, os valores máximos superaram 1000 NMP/100mL em 41 ocasiões. No cenário 7.1 (junho de 2013), houve a ocorrência de uma concentração de CT de 2670.7 NMP/100mL (Tabela 27) em 300hs de simulação (Figura 75) e, no cenário 9.1 (junho de 2016), houve a ocorrência de concentração de CT de 2579.9 NMP/100mL (Tabela 27) em 270 hs do início da simulação (Figura 76). Esses valores desrespeitaram a resolução CONAMA 274 de 2000, a qual estabelece o valor limite na concentração de CT de 2500 NMP/100mL (Tabela 10). Porém, em todo o restante dos cenários, as concentrações resultantes do modelo obedeceram a resolução CONAMA 274, 2000.

No cenário 9 (Figura 76), um evento extremo foi detectado no dia 20/08/2016, com início em aproximadamente 1900 hs. Nesse instante de tempo, o vento médio no CSS foi superior a 10 m.s^{-1} (segundo painel da Figura 76) e a elevação do nível do mar (painel superior na Figura 76) foi de aproximadamente 0.9 m, o maior valor encontrado para a simulação. Este evento fez com que a média geométrica da concentração de CT no setor 4a apresentasse um pequeno aumento, alcançando 1.10 NMP/100mL, mas que logo foi dispersado pois, a passagem do fenômeno causou uma grande dispersão da pluma de CT para norte. Após a passagem dessa frente, ventos intensos de leste e nordeste ocasionaram o aumento da média geométrica no setor 2a no período de 1950 hs a 2150 hs. Assim como nos outros cenários, nos quais ventos de nordeste e leste intensos ocasionaram máximos de concentração de CT no setor 2a, o cenário 9 apresentou as maiores concentrações no mesmo setor. Vale ressaltar que os cenários 7 e 9 (de inverno) apresentaram concentrações máximas de CT maiores em relação aos cenários 6 e 8 (de verão), as quais foram encontradas no setor 2a. Para demonstrar a dispersão das plumas

de CT dos emissários submarinos, devido à passagem do fenómeno extremo de agosto de 2016, seis instantes de tempo foram seleccionados na simulação do cenário 9 (Figura 77): 1911 h (19/08/2016 15:00), 1926 h (20/08/2016 6:00), 1929 h (20/08/2016 9:00), 1932 h (20/08/2016 12:00), 1947 h (21/08/2016 3:00) e 1983 h (23/08/2016 6:00) após o início do cenário 9. A entrada de frente fria é detectada em 1926 h.

Figura 75: O painel superior apresenta a elevação da superfície do mar (m) ao longo do tempo, o segundo painel, o vento médio (m.s^{-1}) utilizado no CSS, o terceiro, a média geométrica (NMP/100mL) da concentração de CT em cada setor na coluna de água (vide legenda, Figura 63) e, o painel inferior, apresenta os valores máximos da concentração de CT (NMP/100mL) encontrados para cada setor (legenda) na coluna de água, durante a simulação do cenário 7. Tempo total de 2160 hs ou 90 dias, pois apresenta sequencialmente os meses (30 dias ou 720 hs) de simulação: junho, julho e agosto. A legenda indica os 10 setores da Figura 63.

Figura 76: O painel superior apresenta a elevação da superfície do mar (m) ao longo do tempo, o segundo painel, o vento médio (m.s^{-1}) utilizado no CSS, o terceiro, a média geométrica (NMP/100mL) da concentração de CT em cada setor na coluna de água (vide legenda, Figura 63) e, o painel inferior, apresenta os valores máximos da concentração de CT (NMP/100mL) encontrados para cada setor (legenda) na coluna de água, durante a simulação do cenário 9. Tempo total de 2160 hs ou 90 dias, pois apresenta sequencialmente os meses (30 dias ou 720 hs) de simulação: junho, julho e agosto. A legenda indica os 10 setores da Figura 63.

No trabalho de Soares (1994), a substância conservativa estudada dispersou-se para o sul do CSS na simulação que possuía vento constante de nordeste e, para o norte do CSS, na simulação numérica que possuía vento constante de sudoeste. O mesmo foi observado nos nossos cenários 2, 3, 6, 7, 8 e 9. Nos outros cenários (4 e 5), os ventos de nordeste introduzidos foram inferiores à 4 m.s^{-1} e, portanto, inferiores às intensidades típicas de ventos médios no CSS observados por Castro (1990), com intensidade de 4.2 m.s^{-1} . Consequentemente, a forçante termohalina sobrepôs-se à ação dos ventos nesses dois cenários movimentando as plumas de CT para norte, na maior parte do tempo.

Persistência no tempo

Nessa seção, apresentamos os mapas de persistência no tempo (em %) para as concentrações de coliformes termotolerantes (CT). Através desses mapas, apresentamos a porcentagem do tempo de simulação em que uma determinada região ou ponto de grade do modelo esteve com concentrações acima de 10 NMP/100mL e 100NMP/100mL, para cada cenário.

Nos cenários 1 (contabilizando apenas a estratificação sem campo de ventos no modelo de CA), 2 (com vento constante de sudoeste) e 3 (com vento constante de nordeste) (Figura 78), as adjacências do emissário do Araçá apresentaram concentrações superiores a 10 NMP/100mL em 100% do tempo. Podemos notar que no cenário 3 a região com persistência igual a 100% é menor em relação aos cenários 1 e 2. Em 1 e 2, as maiores persistências são bastante similares, e se distribuem similarmente em ambos cenários. Como já discutido anteriormente, no cenário 1 a única forçante no modelo de CA é a forçante termohalina, fazendo com que a pluma do Araçá apresente, na direção norte do canal, maiores valores de persistência (Figura 78). Esse mesmo efeito para a pluma do Araçá é observado para o cenário 2, mas, nesse caso, existe a forçante de vento constante de sudoeste que atua no modelo de CA. Isso reforça ainda mais o deslocamento da pluma para a região norte de CSS (Figura 78).

Já no cenário 3 (Figura 78), com um vento constante de nordeste, as maiores persistências são deslocadas para sul devido à direção do vento. Com exceção do cenário 3, as localizações dos três emissários puderam ser detectadas nos mapas de persistência para concentrações maiores que 10 NMP/100mL. No cenário 3, o emissário de Cigarras não foi detectado no mapa, pois não apresentou concentrações que fossem superiores a

Figura 77: Concentração de CT integrada em profundidade (NMP/100mL), indicada pela legenda no canto superior esquerdo de cada figura, nos instantes de tempo em 1911 h, 1926 h, 1929 h, 1932 h, 1947 h e 1983 h após o início da simulação do cenário 9 (inverno de 2016), intervalo no qual houve a passagem de frente fria (do dia 19/08/2016 a 23/08/2016) na região.

10 NMP/100mL (Figura 78).

Um modelo de dispersão desenvolvido por Soares (1994) calculou, com base nos resultados hidrodinâmicos para inverno de Castro (1985), a dispersão horizontal de um traçador passivo e conservativo com carga inicial de 250000 toneladas no ponto central do CSS. Os resultados mostraram que, para uma situação hipotética de vento constante, como usado nos cenários 2 e 3, quatro dias são suficientes para praticamente limpar o CSS. Os cenários 2 e 3 (Figura 78) mostraram que a maior parte da área do CSS possui concentrações baixas, inferiores a 10 NMP/100mL, quando o modelo é forçado com vento constante e, portanto, corroboram com os resultados de Soares (1994). As áreas adjacentes ao emissário do Araçá são as únicas que apresentam concentrações superiores a 100 NMP/100mL nas simulações e, portanto, são as áreas mais impactadas de acordo com os resultados da modelagem para todos os cenários hidrodinâmicos propostos (Figuras 78 a 83). Ainda assim, a legislação foi respeitada para os valores encontrados no modelo.

Figura 78: Persistência no tempo de concentrações de CT maiores que 10 NMP/100mL (painéis a esquerda) e 100 NMP/100mL (painéis a direita) para os cenários 1 (painel superior), 2 (painel central) e 3 (painel inferior).

Assim como nos cenários 1, 2 e 3, os cenários 4 (frente fria com maré) e 5 (frente fria sem maré) (Figura 79) apresentaram persistência de 100% no tempo para concentrações superiores a 10 NMP/100mL nas áreas adjacentes ao emissário do Araçá. Entretanto, a região com persistência de 100% nos cenários 4 e 5 é menor do que a região nos cenários 1, 2 e 3. Notamos que a distribuição das persistências é muito parecida para os cenários 4 e 5 e que os valores de persistência variam muito pouco entre si, tanto para concentrações maiores que 10 NMP/100mL (Tabela 31) quanto para maiores que 100 NMP/100mL (Tabela 32). Os resultados dos cenários 4 e 5 simularam os processos hidrodinâmicos no CSS, com uma distribuição da persistência que tende para norte devido as passagens de frentes frias e forçante termohalina, mas também possuem uma região da pluma, com concentrações de CT acima de 10 NMP/100mL, com persistência de aproximadamente

20% no tempo de simulação que se estende para sul.

Figura 79: Persistência no tempo de concentrações de CT maiores que 10 NMP/100mL (painéis a esquerda) e 100 NMP/100mL (painéis a direita) para os cenários 4 (superior) e 5 (inferior).

As Tabelas 31 e 32 mostram a persistência no tempo para concentrações de CT maiores que 10 NMP/100mL e 100 NMP/100mL, respectivamente, nos setores de cada cenário idealizado. No setor 2a, concentrações acima de 10 NMP/100mL foram observadas em 100% do tempo em todos os cenários idealizados. Concentrações maiores que 100 NMP/100mL tiveram persistência de 100% no setor 2a nos cenários 1 e 3.

Tabela 31: Persistência no tempo (%) máxima para as concentrações de CT que foram maiores que 10 NMP/100mL para os setores em estudo para os cenários idealizados.

Persistência 10 NMP/100mL (%) - Cenários idealizados					
Setores	1	2	3	4	5
1a	0.0	0.0	32.5	3.8	3.8
1b	0.0	0.0	32.5	3.1	3.8
2a	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2b	0.6	7.5	86.9	26.9	17.5
3a	100.0	100.0	76.2	86.2	86.9
3b	98.8	100.0	65.6	95.0	96.9
4a	63.7	69.4	6.2	46.9	49.4
4b	100.0	99.4	100.0	99.4	99.4
5a	48.8	39.4	3.1	36.2	40.0
5b	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0

Tabela 32: Persistência no tempo (%) máxima para as concentrações de CT que foram maiores que 100 NMP/100mL para os setores em estudo para os cenários idealizados.

Persistência 100 NMP/100mL (%) - Cenários idealizados					
Setores	1	2	3	4	5
1a	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1b	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2a	100.0	91.2	100.0	94.4	93.1
2b	0.0	0.0	10.6	4.4	5.0
3a	70.6	53.1	16.9	57.5	61.9
3b	5.6	2.5	2.5	1.2	0.6
4a	2.5	1.2	0.0	0.0	0.0
4b	1.9	0.0	1.9	4.4	1.9
5a	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5b	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Em todos os cenários reais, o setor 2a apresentou concentrações superiores a 10 NMP/100mL em 100% do tempo. Esse valor ainda é 2 ordens de grandeza mais baixo do que o limite CONAMA (Tabela 10), de 1000 NMP/100mL.

A Figura 80 apresenta o cenário 6, correspondente aos meses de dezembro de 2012 (cenário 6.1) e janeiro (cenário 6.2) e fevereiro de 2013 (cenário 6.3). A simulação 6.2 apresentou concentrações superiores a 10 NMP/100mL em uma região maior e mais ao sul do que os cenários 6.1 e 6.3 (Figura 80). Isso deve aos ventos mais intensos em janeiro de 2013 (cenário 6.2) que fez com que a pluma do Araçá se estendesse em uma maior região, tanto ao sul, quanto ao norte no emissário. Nesse cenário, a pluma com concentrações superiores a 10 NMP/100mL se estendeu de forma similar para sudoeste e nordeste, ainda que as maiores persistências fossem encontradas ao norte do emissário, devido às maiores intensidades do vento de sul e sudoeste, que representam entradas de frentes frias, durante janeiro de 2013. Nos cenários 6.1 e 6.3, foi observada maiores persistências concentradas próximas a costa do Araçá, relativamente ao cenário 6.2. Isso se deve aos ventos de nordeste serem predominantes e devido a menor entrada de frentes frias e por serem menos intensas, durante os cenários 6.1 e 6.3. Concentrações superiores a 100 NMP/100mL persistiram nas áreas adjacentes do emissário do Araçá, e tiveram baixa persistência no emissário de Itaquanduba, com 5.4 %, 8.3% e 5.3% para o setor 4b, e nenhuma persistência em Cigarras (Tabela 34).

Figura 80: Persistência no tempo (%) de concentrações de CT maiores que 10 NMP/100mL (esquerda) e 100 NMP/100mL (direita) para o cenário 6. Painel superior: cenário 6.1 (dezembro de 2012), painel central: cenário 6.2 (janeiro de 2013) e painel inferior: cenário 6.3 (fevereiro de 2013).

No inverno de 2013 (cenários 7.1, 7.2 e 7.3, Figura 81), uma persistência maior no tempo foi encontrada, tanto para concentrações superiores a 10NMP/100mL quanto 100NMP/100mL, em comparação ao verão de 2013 (cenários 6.1, 6.2 e 6.3) (Figura 80), devido a radiação solar ser menor no inverno e, portanto, o decaimento bacteriano também ser menor. Os cenários 7.1 e 7.2, que correspondem a junho e julho de 2013, respectivamente, apresentaram áreas mais extensas onde a concentração foi superior a 10 NMP/100mL em relação ao mês de agosto de 2013 (cenário 7.3, Figura 81). Isso provavelmente ocorre devido aos ventos de sudoeste mais intensos durante agosto de 2013, que fizeram com que a dispersão da pluma de CT fosse maior, e portanto as suas persistências ficaram reduzidas relativamente à junho e julho de 2013.

Figura 81: Persistência no tempo de concentrações de CT maiores que 10 NMP/100mL (esquerda) e 100 NMP/100mL (direita) para o cenário 7. Pannel superior: cenário 7.1 (junho de 2013), pannel central: cenário 7.2 (julho de 2013) e pannel inferior: cenário 7.3 (agosto de 2013).

No verão de 2016 (Figura 82), a persistência de concentrações de CT superiores à 10 NMP/100mL foi similar para as regiões ao norte e ao sul do emissário do Araçá. Mesmo assim, a região ao norte do emissário apresenta persistências maiores que 65% (Tabela 33) em uma área mais extensa do que ao sul do emissário. Podemos notar que, concentrações de CT superiores a 10 NMP/100mL, persistiram de forma similar na região nos três meses de simulação desse período (dezembro de 2015, janeiro e fevereiro de 2016). Isso provavelmente ocorre devido ao predomínio de ventos de nordeste nas três simulações e penduram por mais tempo do que os ventos de sudoeste na região (segundo pannel da Figura 74). Concentrações superiores a 100 NMP/100mL só foram observadas nas adjacências do emissário do Araçá (Figura 82).

Ao longo da simulação de dezembro de 2012 (cenário 6.1) (Figura 80), os ventos

de nordeste predominaram por mais tempo em relação a dezembro de 2015 (cenário 8.1) (Figura 82). No cenário 8.1, os ventos de sudoeste foram mais intensos. Consequentemente, maiores valores de persistência no setor 3a foram encontrados para o cenário 6.1, de 78.3%, em relação ao cenário 8.1, com valor de 65.4% (Tabela 33). Além disso, a menor ocorrência de ventos de sul, durante o fevereiro de 2013 (Figuras 80), ocasionou uma maior persistência de concentrações acima de 10 NMP/100mL, de 84.6% no setor 3a (Tabela 33), na região do Araçá, comparativamente a fevereiro de 2016 (Figura 82), com valor de 71.2% (Tabela 33). Os cenários de janeiro de 2013 e 2016, não apresentaram persistências que diferissem muito entre si para o setor 3a, com valores de 62.5% e 65.0%, respectivamente (Tabela 33). Portanto, de maneira geral, o verão de 2013 apresentou maiores persistências de concentrações de CT que estivessem acima de 10 NMP/100ml do que o verão de 2016, nas proximidades da baía do Araçá.

Figura 82: Persistência no tempo (%) de concentrações de CT maiores que 10 NMP/100mL (esquerda) e 100 NMP/100mL (direita) para o cenário 8. Painel superior: cenário 8.1 (dezembro de 2015), painel central: cenário 8.2 (janeiro de 2016) e painel inferior: cenário 8.3 (fevereiro de 2016).

No inverno de 2016, para os três meses de simulação (Figura 83), a persistência no tempo de 10 NMP/100mL e 100NMP/100mL é superior a todos os outros cenários, sejam eles reais ou idealizados. É possível detectar os três emissários submarinos nos mapas de inverno de 2016, com exceção do emissário de Cigarras que não apresenta persistência para concentrações acima de 100 NMP/100mL.

Em junho de 2016 (cenário 9.1, Figura 83), as plumas do Araçá e Itaquanduba se estenderam, na maior parte do tempo, para nordeste, ainda que apresentem persistências de 60% ao sul do emissário do Araçá e Itaquanduba. Além disso, o cenário 9.1 simulou as maiores persistências retidas próximas a costa do Araçá, relativamente aos cenários 9.2 e 9.3. Analisando o campo de ventos (Figura 76), é possível notar que, entre 50 hs a 250 h da simulação, os ventos eram fracos, com intensidade de, aproximadamente, 3 m.s^{-1} ,

e predominantemente de sudoeste. Somado à isso, de 250 hs até o final da simulação do cenário 9.1 (em 720 hs da Figura 76), os ventos do quadrante norte foram pouco intensos, com intensidades inferiores a 3 m.s^{-1} , e, em vários momentos, apontavam em direção ao continente, o que favoreceu, ainda mais, para que as maiores persistências de CT fossem encontradas próximas a costa em junho de 2016 (Figura 83). Adicionalmente, os ventos de baixa intensidade no cenário 9.1 favoreceram para que as persistências fossem maiores.

Em julho de 2016 (cenário 9.2, Figura 83), na maior parte do tempo, as plumas do Araçá e Itaquanduba se estenderam para a região ao sul das mesmas, ainda que apresentassem persistências de 60% ao norte dos emissários. A extensão dessas plumas para regiões mais ao sul do canal, se deve à presença de ventos de norte e noroeste mais intensos comparativamente ao cenário 9.3 e, principalmente, ao cenário 9.1. Além disso, a presença da entrada de uma frente fria, com ventos de até 5 m.s^{-1} entre 1100 hs e 1200 hs (Figura 76), causou um aumento na dispersão da pluma, o que gerou uma diminuição da persistência na região do Araçá.

O cenário 9.3, de agosto de 2016, é semelhante ao cenário 9.2, porém, o que os tornou diferentes, foram as menores persistências encontradas ao sul da pluma do Araçá e maiores persistências simuladas para a região ao norte do Araçá no cenário 9.3. Isso se deve as maiores intensidades dos ventos de sudoeste neste período e devido à passagem de um fenômeno anômalo, que foi detectado pelo modelo no instante de, aproximadamente, 1950 hs do cenário 9 (Figura 76), os quais causaram uma maior dispersão da pluma para a região norte do canal, o que acarretou em persistências maiores (Figura 83).

Figura 83: Persistência no tempo (%) de concentrações de CT maiores que 10 NMP/100mL (esquerda) e 100 NMP/100mL (direita) para o cenário 9. Painel superior: cenário 9.1 (junho de 2016), painel central: cenário 9.2 (julho de 2016) e painel inferior: cenário 9.3 (agosto de 2016).

As Tabelas 33 e 34 apresentam as persistências ao longo do tempo máximas nas simulações para as concentrações de CT superiores a 10 NMP/100mL e 100 NMP/100mL, respectivamente, nos setores dos cenários reais. Para todos os cenários, o setor 2a teve persistência de concentrações de CT maiores que 10 NMP/100mL em 100% do tempo. É possível notar persistências bastante baixas para os setores 1a, 1b, 5a e 5b, que são os mais distantes dos emissários submarinos. Os dados dos pontos costeiros (Tabelas 14 e 15) não incluem os períodos de verão e inverno de 2013 e 2016, o que limita as comparações com o modelo. Todavia, observa-se que o ponto 3 está localizado dentro do setor 5a e, comparando-se as persistências do setor 5a com as concentrações do ponto costeiro 3 da baía de Caraguatatuba (Figura 17), pode-se concluir que o modelo representa qualitativamente bem essa região (setor 5a) por apresentar baixas persistências (máximo de

2.5%) para concentrações acima de 10 NMP/100mL (Tabela 33) e nenhuma persistência (0%) para concentrações acima de 100 NMP/100mL (Tabela 34). Nos dados, não foram encontradas concentrações de CT superiores à 5 NMP/100mL nas amostras do ponto 3, desde 29/08/2012 (Tabela 15). Entretanto, cabe ressaltar que as amostras foram sempre nos meses de outono e primavera e, portanto, não correspondentes com as simulações realizadas. As coletas de água poderiam ser realizadas, com maior n amostral diário, no período de verão e inverno para os pontos costeiros, que é o período mais chuvoso (Figura 19) e com turismo elevado na região. Dadas as limitações citadas anteriormente e pela proximidade de outras fontes poluidoras (córregos) dos pontos, os dados dos pontos costeiros 1, 2, 3, 4 e 5 do canal de São Sebastião (Tabela 14) não foram comparados com os resultados de modelo dos setores 3a, 3b, 4a, 4b, 5a e 5b.

Tabela 33: Persistência no tempo (%) máxima para as concentrações de CT que foram maiores que 10 NMP/100mL para os setores em estudo para os cenários reais.

Persistência 10 NMP/100mL (%) - Cenários reais												
Setores	6.1	6.2	6.3	7.1	7.2	7.3	8.1	8.2	8.3	9.1	9.2	9.3
1a	8.3	18.8	13.7	24.2	24.6	23.3	17.1	15.4	9.6	14.2	23.8	29.6
1b	5.0	14.2	11.0	16.7	16.7	12.5	12.5	10.0	8.3	9.6	15.0	15.4
2a	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2b	33.8	49.2	39.6	60.4	55.4	55.0	44.6	46.2	45.4	38.8	69.2	62.9
3a	78.3	62.5	84.6	64.2	57.1	58.3	65.4	65.0	71.2	80.4	53.8	51.2
3b	82.9	79.2	90.7	95.4	94.2	93.3	86.2	77.5	87.5	96.2	93.3	85.0
4a	40.8	33.3	41.4	41.2	45.8	41.2	32.9	34.6	38.3	62.5	30.0	37.9
4b	93.3	90.4	90.7	99.6	96.2	95.8	95.8	88.3	96.7	99.6	99.6	97.1
5a	24.6	25.0	19.8	42.9	45.0	39.6	24.2	20.0	23.3	45.8	38.3	40.8
5b	0.4	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0

Tabela 34: Persistência no tempo (%) máxima para as concentrações de CT que foram maiores que 100 NMP/100mL para os setores em estudo para os cenários reais.

Persistência 100 NMP/100mL (%) - Cenários reais												
Setores	6.1	6.2	6.3	7.1	7.2	7.3	8.1	8.2	8.3	9.1	9.2	9.3
1a	0.4	0.0	0.0	2.5	1.2	0.0	1.2	0.0	0.0	0.4	0.8	0.8
1b	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0
2a	78.3	74.2	80.6	89.6	78.3	80.0	76.7	76.7	77.9	88.3	88.3	80.4
2b	7.1	11.2	7.0	22.1	26.2	20.8	7.9	7.5	10.0	17.1	34.6	30.0
3a	29.6	21.7	33.9	36.2	25.4	22.5	27.9	29.6	25.8	52.9	26.7	22.5
3b	2.9	2.5	2.2	16.2	7.1	5.8	0.8	1.2	2.9	19.6	14.6	6.2
4a	2.9	0.0	0.4	5.0	3.3	2.1	0.4	0.4	0.8	10.4	2.5	3.8
4b	5.4	8.3	5.3	30.0	21.2	22.1	2.5	5.8	8.3	33.3	34.2	23.8
5a	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5b	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

As Tabelas 35 e 36 apresentam a persistência no tempo máxima simulada para

concentrações de CT maiores que 10 NMP/100mL e 100 NMP/100mL, respectivamente, nos pontos de grade do modelo correspondentes aos emissários submarinos (ES Araçá, ES Cigarras e ES Itaquanduba) e aos pontos de praia monitorados pela CETESB (Preta do Norte, Cigarras e Itaquanduba)(Figura 63) para cada cenário proposto.

As persistências mínimas encontradas para concentrações de CT maiores que 10 NMP/100mL no CSS foram: 0% para Preta do Norte, 100% para ES Araçá, 0% para Cigarras, 2.3% para ES Cigarras e 0.9% para praia de Itaquanduba e 59.6% para ES Itaquanduba. Já as persistências máximas encontradas foram: 99.1% para Preta do Norte, 100.0% para ES Araçá, 10.4% para Cigarras, 48.7% para ES Cigarras, 45.4% para praia de Itaquanduba e 100% para ES Itaquanduba. Mostrando que as regiões do Araçá e de Itaquanduba ficaram, de maneira geral, mais poluídas ao longo do tempo (Tabela 35). Para a praia Preta do Norte, as maiores persistências de concentrações maiores que 10 NMP/100mL (Tabela 35) foram nos cenários 2 (99.1%), 9.2 (65.4%), 9.3 (62.1%) e cenário 7 (54.6%, 54.2% e 52.9%). Já na praia de Cigarras, as maiores persistências de concentrações acima de 10 NMP/100mL foram nos cenários 7.2 e 9.3, de 10.4% e 10.0%, respectivamente. Na praia de Itaquanduba, as maiores persistências foram nos cenários 9.3 (45.4%), 9.1 (42.5%) e 3 (42.0%).

Tabela 35: Persistência da pluma no tempo (%) máxima para concentrações de CT maiores que 10 NMP/100mL para 6 pontos de estudo: praia Preta do Norte, emissário submarino (ES) do Araçá, praia das Cigarras, ES das Cigarras, praia de Itaquanduba e ES de Itaquanduba. Nota: C = cenários.

Persistência 10 NMP/100mL (%) - Pontos de praia e emissários submarinos						
C	Preta do Norte	ES Araçá	Cigarras	ES Cigarras	Itaquanduba	ES Itaquanduba
1	0.0	100.0	0.0	48.8	34.6	100.0
2	99.1	100.0	0.0	2.3	0.9	100.0
3	0.0	100.0	0.0	42.0	42.0	99.6
4	26.3	100.0	0.6	36.3	30.4	99.4
5	19.3	100.0	1.1	40.3	39.2	99.4
6.1	31.7	100.0	0.8	23.8	16.2	90.8
6.2	46.2	100.0	0.8	24.2	11.7	84.6
6.3	34.4	100.0	0.0	18.5	20.3	87.7
7.1	54.6	100.0	5.8	42.1	32.5	99.6
7.2	54.2	100.0	10.4	43.8	19.2	91.7
7.3	52.9	100.0	5.0	39.2	17.5	91.2
8.1	41.7	100.0	0.8	23.3	12.9	93.3
8.2	42.9	100.0	0.4	19.2	15.4	85.8
8.3	39.2	100.0	1.2	22.9	17.9	93.3
9.1	30.8	100.0	5.8	43.3	42.5	98.3
9.2	65.4	100.0	5.8	38.3	20.0	95.8
9.3	62.1	100.0	10.0	39.6	45.4	59.6

As persistências mínimas encontradas para concentrações de CT maiores que 100 NMP/100mL no CSS foram: 0% para todos os pontos, exceto para ES Araçá, com persistência mínima de 74.2%. Já as persistências máximas encontradas foram: 37.5% para Preta do Norte, 100.0% para ES Araçá, 0.0% para Cigarras e para ES Cigarras, 0.4% para praia de Itaquanduba e 32.5% para ES Itaquanduba. Isso mostra, novamente, que as regiões do Araçá e de Itaquanduba ficaram, de maneira geral, mais poluídas ao longo do tempo em relação a Cigarras (Tabela 36). Para a praia Preta do Norte, as maiores persistências de concentrações > 100 NMP/100mL (Tabela 36) foram nos cenários 9.2 (37.5%), 2 (34.4%) e 9.3 (30.4%). Nos pontos de praia e do ES de Cigarras e ES Itaquanduba, nenhum ponto monitorado teve concentrações acima de 100 NMP/100mL. Já na praia de Itaquanduba, as maiores persistências foram nos cenários 9.2 (32.5%), 9.1 (30.0%) e 7.1 (28.7%).

Tabela 36: Persistência no tempo (%) máxima para concentrações de CT que foram maiores que 100 NMP/100mL para 6 pontos em estudo: praia Preta do Norte, emissário submarino (ES) do Araçá, praia das Cigarras, ES das Cigarras, praia de Itaquanduba e ES de Itaquanduba. Nota: C = cenários.

Persistência 100 NMP/100mL (%) - Pontos de praia e emissários submarinos						
C	Preta do Norte	ES Araçá	Cigarras	ES Cigarras	Itaquanduba	ES Itaquanduba
1	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.8
2	34.4	100.0	0.0	0.0	0.0	1.4
3	0.0	94.1	0.0	0.0	0.0	0.0
4	5.8	94.7	0.0	0.0	0.0	4.1
5	7.2	93.9	0.0	0.0	0.0	1.7
6.1	6.2	78.3	0.0	0.0	0.0	5.4
6.2	12.5	74.2	0.0	0.0	0.0	8.3
6.3	10.6	80.2	0.0	0.0	0.0	5.3
7.1	27.1	89.6	0.0	0.0	0.0	28.7
7.2	25.4	78.3	0.0	0.0	0.0	19.6
7.3	22.5	79.6	0.0	0.0	0.0	21.7
8.1	10.0	76.7	0.0	0.0	0.0	2.5
8.2	11.2	76.7	0.0	0.0	0.0	5.8
8.3	12.1	77.9	0.0	0.0	0.0	7.5
9.1	16.2	88.3	0.0	0.0	0.0	30.0
9.2	37.5	88.3	0.0	0.0	0.0	32.5
9.3	30.4	79.6	0.0	0.0	0.4	4.2

A Tabela 37 mostra os locais onde foram detectadas persistências superiores a 0% para concentrações acima de 1000 NMP/100mL. Esses locais foram o setor 2a e o ponto de grade para o emissário submarino do Araçá. As maiores persistências foram encontradas durante os invernos de 2013 (cenário 7) e 2016 (cenário 9). Isso pode ser explicado pelos maiores valores de concentração de CT encontrados nesses cenários. Assim, podemos concluir que na maior parte do tempo e para a maior parte da região do CSS, as concentrações de CT obedeceram a resolução nº20/274 CONAMA. Gubitoso et al. (2008) estudaram o emissário do Araçá e também não encontrou concentrações acima do limite CONAMA para a região adjacente a este emissário. De acordo com Soares (1994), quatro dias de experimentos foram suficientes para praticamente limpar o CSS. Porém, esse fato não pode ser tomado como uma medida para acidentes desse tipo, dado que as condições de vento do autor eram fictícias com ventos soprando com intensidade e direção constantes durante 20 dias.

Tabela 37: Os locais e os cenários onde houve persistência no tempo (%), de concentrações de CT superiores a 1000 NMP/100mL no modelo. Setor 2a está indicado na Figura 63 e ES Araçá indica ponto do emissário submarino do Araçá no modelo (Figura 17).

Persistência no tempo (%) em locais com concentração superior a 1000 NMP/100mL.													
Setor 2a	Cenário	2	6.1	6.2	6.3	7.1	7.2	7.3	8.1	8.3	9.1	9.2	9.3
	Persistência	0.6	0.4	2.1	0.9	8.3	4.2	5.0	0.4	0.8	7.9	8.3	6.2
ES Araçá	Cenário	7.1	7.3	9.1	9.2	9.3							
	Persistência	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1							

Podemos observar as menores persistências para a região adjacente ao emissário de Cigarras. As persistências de CT tanto nos setores quanto nos pontos monitorados foram superiores nos cenários de inverno em relação aos cenários de verão, o que é oposto ao observado nos dados, pois estes contabilizam outras fontes de CT além dos emissários. No inverno, a radiação solar é menor o que causa um menor decaimento bacteriano e portanto uma maior persistência das concentrações no ambiente.

De acordo com os resultados do modelo, os emissários submarinos não estão afetando a balneabilidade (Tabela 10) das praias nas áreas adjacentes do canal de São Sebastião pois não apresentaram, mais que 20% do tempo ou em cinco amostras consecutivas, com concentrações de CT acima de 1000 NMP/100mL. Apenas dois valores acima de 2500 NMP/100mL foram detectados pelo modelo, nos cenários de junho de 2013 e 2016. Como era esperado, nos pontos de grade, onde os emissários submarinos se localizam (ES Araçá, ES Cigarras e ES Itaquanduba nas Tabelas 35 e 36), houve uma persistência máxima resultante naquela região, já que esses pontos são as fontes de CT para a dispersão. O ES Araçá foi o que apresentou as maiores persistências para concentrações acima de 10 NMP/100mL e 100 NMP/100mL, além de persistências de 0.1% para concentrações acima de 1000 NMP/100mL.

Para as praias de Itaquanduba e de Cigarras, o modelo não mostrou concentrações de CT, que são exclusivamente provindas dos emissários submarinos, que fossem preocupantes em relação à balneabilidade dessas praias. Porém, essas são as regiões costeiras mais próximas dos emissários de Itaquanduba e Cigarras, respectivamente, e portanto devem ser monitoradas continuamente. Além disso, vale lembrar que as três praias estudadas possuem córregos importantes em suas regiões que afetam a sua balneabilidade. As coletas de água nas praias poderiam incluir também medições de coliformes termotolerantes e não somente enterococos, para complementar a avaliação de balneabilidade.

De forma geral, o modelo detectou que, quando houve a presença de ventos de intensidade baixa ou média na região do CSS, a persistência no tempo para as plumas de coliformes termotolerantes dos emissários foi maior. Quando houve a passagem de frente fria, com a presença de ventos intensos, a dispersão das plumas aumentou e a persistência na região costeira é diminuída. As adjacências do emissário do Araçá foram as mais atingidas por coliformes termotolerantes de acordo com o modelo, em todos os cenários hidrodinâmicos propostos. De maneira geral, os setores 2a e 3a são os mais impactados devido à presença do emissário do Araçá. As regiões adjacentes mais atingidas pela dispersão de CT no modelo são as áreas costeiras continentais, desde a praia de Barequeçaba até a praia Deserta (Figura 84). As regiões mais impactadas pelos emissários do CSS estão descritas na Tabela 38 e também representadas pela linha de costa em vermelho no mapa da Figura 84. As persistências das concentrações de CT acima de 10 NMP/100mL para agosto de 2016, o qual foi o pior cenário deste trabalho, foram representadas também na Figura 84.

Tabela 38: Regiões (ou setores) mais atingidas(os) pela dispersão de concentrações de CT do modelo e locais importantes que estão presentes nos respectivos setores.

Setores	Locais
2a	praia Barequeçaba, CEBIMAR (USP), praia Grande e praia Preta do Norte.
3a	baía do Araçá, praias Porto Grande e Deserta, porto de São Sebastião e TEBAR.

Figura 84: Regiões mais impactadas pelas concentrações de CT provindas dos emissários submarinos nas simulações (linha vermelha). As principais praias e localidades na região mais impactada estão pontuadas no mapa em amarelo. Adicionalmente, a persistência de concentrações acima de 10 NMP/100mL para o pior cenário encontrado (agosto de 2016) foi apresentado, para exemplificar a pior situação possível encontrada.

Conclusões

Este trabalho utilizou o acoplamento dos modelos de campo próximo e campo afastado para o estudo dos três emissários submarinos no canal de São Sebastião. A ativação do módulo de qualidade de água, no modelo numérico sECOM, foi realizada de forma não-conservativa, implementando-se um decaimento bacteriano. As correntes oceânicas paralelas e perpendiculares à costa, simuladas para dentro do canal de SS, foram validadas com dados correntográficos.

Comparações entre as séries temporais das concentrações de CT do modelo em pontos de grade próximos a 3 pontos de praia da CETESB, onde há coletas semanais de água para análise bacteriana, foram realizadas. Os resultados do modelo foram comparados com 156 amostras de enterococos da CETESB, 12 amostras de enterococos da SABESP e 12 amostras de coliformes termotolerantes da SABESP nas praias Preta do Norte, Cigarras e Itaquanduba. Dados da rede costeira da CETESB também foram qualitativamente comparados com as simulações do modelo. Um dos grandes desafios para a modelagem numérica dos microorganismos foi a ocorrência esparsa de dados, a qual é consequência de limitações operacionais, como o tempo hábil para realizar todas as coletas de água e o custo das análises.

As conclusões desse trabalho foram que:

- O modelo hidrodinâmico sECOM foi capaz de reproduzir satisfatoriamente as observações correntográficas do CSS, sendo que os cenários de inverno foram melhores representados pelo modelo do que os cenários de verão;
- Os modelos de campo próximo e campo afastado foram capazes de representar o decaimento bacteriano e o ciclo diário dos coliformes termotolerantes, os quais dependentem, principalmente, da radiação solar;
- Ao contrário das observações das praias Preta do Norte, Itaquanduba e Cigarras, que apresentaram diversas amostras que descumpriram a resolução CONAMA 274 de 2000, as concentrações de coliformes do modelo descumpriram a resolução em apenas dois instantes de tempo: um em julho de 2013, e outro em julho de 2016. A concentração de coliformes termotolerantes nesses instantes foi superior a 2500 NMP/100mL. Porém, em todo o restante dos cenários, as concentrações resultantes

do modelo obedeceram a Resolução CONAMA 274 (2000);

- O modelo *sECOM* foi capaz de reproduzir a dispersão de coliformes termotolerantes provenientes dos emissários submarinos no canal de São Sebastião. Assim como nos pontos da rede costeira da CETESB, os resultados do modelo mostraram que a hidrodinâmica presente no canal foi capaz de dispersar os coliformes termotolerantes mantendo a qualidade da água nas praias adjacentes;
- A carga inicial e o decaimento bacteriano foram importantes para simular as concentrações de bactérias. O modelo de campo afastado *sECOM* é bastante sensível as concentrações iniciais utilizadas. Dessa forma, quanto maior for o número de observações, mais alta será a confiabilidade nas condições iniciais e mais próximas da realidade serão as simulações numéricas;
- As forçantes estabelecidas nos cenários foram suficientes para dispersar as concentrações de coliformes termotolerantes dentro do canal. De forma geral, os CT dispersaram-se para o sudoeste com o vento de nordeste e para o nordeste com o vento de sudoeste. Esse mesmo fenômeno foi observado por outros autores (Soares 1994; Gregorio 2009; Yang 2016). Porém, períodos de ventos de nordeste fracos, com intensidade inferior a 4 m.s^{-1} , fizeram com que a forçante termohalina se sobrepusesse à ação desses ventos, causando a dispersão das plumas de CT para nordeste dentro do canal;
- Basicamente, o modelo detectou que, quando houve a presença de ventos de intensidade baixa ou média na região do CSS, a persistência no tempo para as plumas de coliformes termotolerantes dos emissários foi maior. Quando ocorreu a passagem de uma frente fria, com a presença de ventos intensos, a dispersão das plumas aumentou e a persistência na região costeira diminuiu;
- Em períodos de ventos constantes de nordeste nas simulações, as concentrações de coliformes termotolerantes encontradas foram mais altas nas plumas dos emissários, principalmente no Araçá. Para o setor 2a, antes da passagem da frente fria no cenário que contabilizou o efeito da maré, as concentrações máximas de coliformes foram superiores ao cenário sem maré. Em períodos de ventos constantes de sudoeste, as concentrações de coliformes termotolerantes foram menores, prin-

principalmente, na região do Araçá. A passagem de frente fria fez com que a pluma do Araçá perdurasse por mais tempo no setor 4a. Além disso, passagens de frentes frias causaram declínio nos valores de concentração no setor 2a, pois a pluma se deslocou na direção norte/nordeste, dispersando e diluindo horizontalmente a pluma. As maiores concentrações máximas de coliformes foram obtidas no setor 2a, quando os ventos eram de nordeste e com intensidade superior ou igual a 4 m.s^{-1} ;

- Os emissários submarinos presentes no canal de São Sebastião são eficientes na dispersão das concentrações de coliformes termotolerantes, pois não foram encontradas concentrações que descumprissem as normas da legislação brasileira nas praias estudadas (Preta do Norte, Itaquanduba e Cigarras);
- Na comparação qualitativa dos resultados de modelo com as observações, em muitos momentos das simulações as concentrações de coliformes termotolerantes foram inferiores aos valores observados nos dados. O modelo incluiu as cargas poluidoras dos emissários, não incluindo as chuvas e portanto, a influência de córregos e fontes clandestinas na região. Desta forma, quando havia uma alta concentração nas observações, o mesmo não era necessariamente encontrado pelo modelo. Sem a existência de dados contínuos da vazão e a da concentração de coliformes dos córregos, ficou impraticável a introdução desta forçante na modelagem numérica. A medição das vazões de córregos no CSS é uma tarefa difícil pois muitos deles são intermitentes e rasos, sem contar a influência da maré, fatos esses que atrapalham a realização de coletas;
- O modelo previu, de maneira eficiente, os momentos de baixas concentrações de coliformes termotolerantes. Nos pontos dos emissários submarinos, que são as fontes de coliformes termotolerantes para a dispersão no modelo, as concentrações simuladas foram, de maneira geral, subestimadas em relação as observações, principalmente para as plumas dos emissários de Itaquanduba e Cigarras. Isso ocorreu pois simulamos exclusivamente a carga poluidora dos emissários submarinos. Apenas nas adjacências do emissário do Araçá é que foram encontradas concentrações de coliformes que estavam acima de 1000 NMP/100mL, mas que não persistiram por mais que 10% do tempo e não descumpriram a legislação. Mesmo assim, toda a área adjacente ao canal de São Sebastião não apresentou persistências relevantes

de concentrações de CT maiores que as estabelecidas pela legislação. A pluma do emissário do Araçá foi a que mais poluiu as adjacências e apresentou a maior dispersão horizontal no decorrer das simulações. Os emissários de Cigarras e Itaquanduba apresentaram concentrações bastante baixas para a região. Na maior parte das simulações, as concentrações de coliformes não alcançaram 200 NMP/100mL. Este resultado indicou que o esgoto doméstico proveniente de emissários submarinos provavelmente não é o grande causador da piora da qualidade das praias adjacentes ao CSS observado em 2013. Provavelmente a poluição advinda dos pequenos córregos e da carga não conectada ao tratamento de esgoto que desembocam no CSS foram responsáveis pelas altas concentrações encontradas nas praias analisadas e desempenharam um papel significativo na poluição marinha da região. Em todos os cenários reais, o setor 2a apresentou concentrações superiores a 10 NMP/100mL em 100% do tempo. Ainda assim, esse valor é 2 ordens de grandeza menor do que o limite CONAMA de 1000 NMP/100mL;

- No setor 2a, houve 5 situações no verão de 2013, 2 situações no verão de 2016, 36 situações no inverno de 2013 e 41 situações no inverno de 2016 em que as concentrações de coliformes termotolerantes foram superiores a 1000 NMP/100mL. Assim, a região do Araçá, que inclui a praia Preta do Norte, apresentou um cenário relativamente pior no verão de 2013 em relação ao verão de 2016, assim como observado nos dados de praia. Adicionalmente, os cenários de inverno apresentaram concentrações de coliformes maiores em relação aos cenários de verão, o que não corroborou com as observações. Ressaltamos que o modelo incorporou exclusivamente a poluição proveniente dos emissários e, portanto, não seria esperado que representasse todas as observações.

Com base nas limitações do modelo utilizado e nas conclusões desse trabalho, as sugestões para trabalhos futuros são:

- Incluir dados de chuva e de vazão e concentração dos pequenos córregos que desembocam no canal de São Sebastião;
- Realizar ao menos duas coletas diárias de coliformes termotolerantes e enterococos, pois bactérias obedecem um ciclo diário de decaimento bacteriano, que não é possível de ser estudado apenas por análises semanais;

- Realizar a medição conjunta de enterococos e coliformes para aumentar a confiabilidade nas observações, já que esses indicadores podem apresentar concentrações bastantes diferentes para a mesma amostra de água do mar;
- Melhorar a estimativa do decaimento bacteriano através de observações de coliformes. Para isso, o n amostral deveria ser horário;
- Incluir outros indicadores de poluição, como por exemplo os enterococos ou nutrientes, afim de estabelecer um modelo mais completo. A balneabilidade das regiões costeiras depende de diversos fatores e indicadores ambientais, e não somente dos coliformes termotolerantes. Um dos grandes benefícios do desenvolvimento de um modelo de transporte e destino de coliformes termotolerantes mais completo, é o monitoramento de praias e regiões costeiras.

Referências

- Bleninger, T. e G. H. Jirka (2004). Near- and far-field model coupling methodology for wastewater discharges. *4th Int. Symp. Environ. Hydraul. 14th Congr. Asia Pacific Div. Int. Assoc. Hydraul. Eng. Res.* (February), 6.
- Blumberg, A., Z.-G. Ji, e C. K. Ziegler (1996). Modelling Outfall Plume Behavior Using Far Field Circulation Model. pp. 610–616.
- Blumberg, A. F. (2010). Stevens ECOM - Users Manual. Appendix II).
- Blumberg, A. F. e G. L. Mellor (1987). A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. *Three-dimensional coastal ocean models*, 1–16.
- Brasil (2000). Resolução 274, de 29 de novembro de 2000. *Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)*.
- Brasil (2005). Resolução 357, de 17 de Março de 2005. *Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)*.
- Brasil Lima, G. D. S. (1998). Efeitos do efluente doméstico do emissário submarino de São Sebastião (SP), sobre o fitoplâncton marinho: estudos de campo e de laboratório. *São Paulo, São Paulo: Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, Master's thesis, 160pp.*
- Cabelli, V. J., A. P. Dufour, L. McCabe, e M. Levin (1983). A marine recreational water quality criterion consistent with indicator concepts and risk analysis. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 1306–1314.
- Castro, B., L. Miranda, L. Silva, R. Fontes, A. Pereira, e A. Coelho (2008). Processos físicos: hidrografia, circulação e transporte. *Oceanografia de um Ecossistema Sub-tropical: Plataforma de São Sebastião, SP, São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo*, 59–121.
- Castro, B. M. (1985). Subtidal response to wind forcing in the south brazil bight during winter (models, shelf, coastal).
- Castro, B. M. (1990). Wind driven currents in the Channel of São Sebastião: winter, 1979. *Brazilian Journal of Oceanography* 38(2), 111–132.

- Castro, B. M., L. B. de Miranda, e S. Y. Miyao (1987). Condições hidrográficas na plataforma continental ao largo de Ubatuba: variações sazonais e em média escala. *Boletim do Instituto Oceanográfico* 35(2), 135–151.
- Castro, B. M. d. e L. B. d. Miranda (1998). Hydrographic properties in the São Sebastião channel: daily variations observed in March 1980. *Revista Brasileira de Oceanografia* 46(2), 111–123.
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (2007a). *Emissários Submarinos: Projeto, Avaliação de Impacto Ambiental e Monitoramento*.
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (2007b). Relatório de Monitoramento de Emissários Submarinos.
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (2012). Qualidade de Águas Superficiais do Estado de São Paulo 2011. pp. 342.
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (2013). Qualidade de Águas Superficiais do Estado de São Paulo 2012. pp. 354.
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (2014a). Qualidade das Praias Litorâneas no Estado de São Paulo 2013. pp. 1–194.
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (2014b). Qualidade de Águas Superficiais do Estado de São Paulo 2013. pp. 365.
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (2015). Qualidade das Águas Salinas e Salobras no Estado de São Paulo 2014. pp. 154.
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (2016a). Qualidade das Águas Salinas e Salobras no Estado de São Paulo 2015. pp. 164.
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (2016b). Qualidade das Praias Litorâneas no Estado de São Paulo 2015.
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (2017a). Qualidade das Águas Salinas e Salobras no Estado de São Paulo 2016. pp. 181.
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (2017b). Qualidade das Praias Litorâneas no Estado de São Paulo 2016.

- Chamberlin, C. E. e R. Mitchell (1978). A decay model for enteric bacteria in natural waters. *Water pollution microbiology* 2, 325–348.
- Coelho, A. (1997). Massas de água e circulação no Canal de São Sebastião (SP). *Massas de água e circulação no Canal de São Sebastião (SP)*.
- Dorner, S. M., W. B. Anderson, R. M. Slawson, N. Kouwen, e P. M. Huck (2006). Hydrologic modeling of pathogen fate and transport. *Environmental science & technology* 40(15), 4746–4753.
- Dottori, M. e B. M. Castro (2009). The response of the São Paulo continental shelf, Brazil, to synoptic winds. *Ocean Dynamics* 59(4), 603–614.
- Dottori, M., E. Siegle, e B. M. Castro (2015). Hydrodynamics and water properties at the entrance of Araçá Bay, Brazil. *Ocean Dynamics* 65(12), 1731–1741.
- Egbert, G. D., A. F. Bennett, e M. G. Foreman (1994). Topex/poseidon tides estimated using a global inverse model. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 99(C12), 24821–24852.
- Egbert, G. D. e S. Y. Erofeeva (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 19(2), 183–204.
- Emílsson, I. (1961). The shelf and coastal waters off southern brazil. *Boletim do Instituto Oceanográfico* 11(2), 101–112.
- Feitosa, R. C. (2007). *Acoplamento de modelos de campo próximo e campo afastado com cinética de decaimento bacteriano variável - aplicações em emissários submarinos*. Ph. D. thesis.
- Ferreira, F. R. (2015). Análise da qualidade ambiental das praias do Guarujá (SP) através da avaliação de lançamentos pontuais de esgotos - Emissário Submarino do Guarujá, canais artificiais e rios da praia do Perequê.
- Fofonoff, N. (1962). Dynamics of ocean currents. *The sea* 1, 323–395.
- Frick, W., P. Roberts, L. Davis, J. Keyes, D. Baumgartner, e K. George (2003). Dilution Models for Effluent Discharges, 4th Edition (Visual Plumes). *U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development* (March).
- Gregorio, H. P. (2009). Modelagem Numérica da Dispersão da Pluma do Emissário Submarino de Santos. pp. 125.

- Gubitoso, S. (2010). Influência de efluentes domésticos e petroquímicos em sedimentos e carapaças de foraminíferos do Canal de São Sebastião, SP. pp. 122.
- Gubitoso, S., W. Duleba, A. C. Teodoro, S. M. Prada, M. M. Rocha, C. C. Lamparelli, J. E. Bevilacqua, e D. O. Moura (2008). Estudo geoambiental da região circunjacente ao emissário submarino de esgoto do Araçá, São Sebastião (SP). *Revista Brasileira de Geociências* 38(3), 467–475.
- IBGE (2010). Censo demográfico.
- Kantha, L. H., G. L. Mellor, e A. F. Blumberg (1982). A diagnostic calculation of the general circulation in the south atlantic bight. *Journal of Physical Oceanography* 12(8), 805–819.
- Kvinge, T. (1967). On the special current and water level variations in the channel of São Sebastiao. *Boletim do Instituto Oceanográfico* 16(1), 23–38.
- Lamparelli, C. C., D. O. Moura, K. C. Pinto, e A. C. Camolez (2016). Monitoring Sea Outfall Discharges in São Paulo Coast - Brazil. *International Symposium on Outfall Systems, 2016*.
- Lohrenz, S. E. e B. M. Castro (2004). Western ocean boundaries panregional overview (W). *The Sea. The global coastal ocean: interdisciplinary studies and syntheses* 14, 3–20.
- Ludwig, R. G. et al. (1988). *Environmental impact assessment: Siting and design of submarine outfalls*. Monitoring and Assessment Research Centre.
- Mancini, J. L. (1978). Numerical Estimates of Coliform Mortality Rates under Various Conditions. *Water environment federation* 1978(370), 4.
- Mellor, G. L. e T. Yamada (1974). A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *Journal of the Atmospheric Sciences* 31(7), 1791–1806.
- Miranda, L. d. (1982). Análise de massas de água da plataforma continental e da região oceânica adjacente: Cabo de São Tomé (RJ) a Ilha de São Sebastião (SP). *Livre Docência, Universidade de São Paulo*.
- Morais, P. H. L. S. (2016). *Hidrodinâmica da Plataforma Continental Interna do estado de São Paulo*. Ph. D. thesis, Universidade de São Paulo.

- Nascimento, R (2017). *Resposta da Plataforma Continental São Paulo ao vento sinótico: estudos numéricos*. Ph. D. thesis, Universidade de São Paulo.
- Pedlosky, J. (1987). *Geophysical Fluid Dynamics*.
- Pereira, A. F., B. M. Castro, L. Calado, e I. C. A. Da Silveira (2007). Numerical simulation of internal tides in the South Brazil Bight and their interaction with the Brazil Current. *J. Geophys. Res* 112.
- Reid, R. O. e B. R. Bodine (1968). Numerical model for storm surges in galveston bay. *Journal of the Waterways and harbors Division* 94(1), 33–58.
- Rezende, J. H. M. d. (2003). *Intrusões da água central do Atlântico Sul na plataforma continental sudeste durante o verão*. Ph. D. thesis, Universidade de São Paulo.
- Roberts, P., J. Bradley, R. Morelissen, e D. A. Botelho (2017). Submarine outfalls as part of the solution to achieve sdgs.
- Roberts, Philip (2016). *Treatment Options for Marine Wastewater Discharges*. pp. 1–194.
- SABESP (2014). *Interpretação dos resultados do monitoramento do S.E.S. Cigarras RNOC/2011/2012/2013*.
- SABESP, D. E. (2015). *Terceiro relatório final anual referente ao monitoramento ambiental da área de influência do emissário submarino do Araçá, no município de São Sebastião, SP*. pp. 1–194.
- SABESP, G. F. B. (2013). *Monitoramento Ambiental do Canal de São Sebastião no entorno do Emissário de Itaquanduba - Relatório Técnico Final*.
- Saha, S., S. Moorthi, X. Wu, J. Wang, S. Nadiga, P. Tripp, D. Behringer, Y.-T. Hou, H. ya Chuang, M. Iredell, M. Ek, J. Meng, R. Yang, M. P. Mendez, H. van den Dool, Q. Zhang, W. Wang, M. Chen, e E. Becker (2011). Ncep climate forecast system version 2 (cfsv2) selected hourly time-series products.
- Siegle, Eduardo e Dottori, Marcelo e Villamarin, Bárbara C. (2017). Hydrodynamics of a subtropical tidal flat: Araçá Bay, Brazil. *Ocean & Coastal Management* (November), 0–1.
- Silva, L. d. S., L. B. Miranda, e B. M. Castro (2005, 12). Numerical study of circulation and thermohaline structure in the São Sebastião Channel. *Revista Brasileira de*

- Geofísica* 23, 407 – 425.
- Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations: I. the basic experiment. *Monthly weather review* 91(3), 99–164.
- Soares, I. D. (1994). Um modelo numérico de dispersão oceânica: aplicações ao Canal de São Sebastião e adjacências.
- Souza, J., J. Azebedo, L. Oliveira, e I. D. Soares (2007). Emissários submarinos, uma alternativa para a disposicao final de efluentes em cidades costeiras. *Departamento de Física. Universidade Federal do Rio Grande. Brasil.*
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research* 106(D7), 7183–7192.
- Thomann, R. V. e J. A. Mueller (1987). *Principles of surface water quality modeling and control*. Harper & Row, Publishers.
- Turra, A., A. C. Z. Amaral, A. Ciotti, C. L. R. Wongtschowski, Y. Schaeffer-Novelli, A. C. Marques, E. Siegle, P. A. D. A. Sinisgalli, C. R. D. Santos, e A. B. Carmo (2017). Environmental impact assessment under an ecosystem approach: the São Sebastião harbor expansion project. *Ambiente & Sociedade* 20(3), 155–176.
- Wen, B., N. Georgas, C. Dujardins, A. Kumaraswamy, e A. Cohn (2017). Modeling pathogens for oceanic contact recreation advisories in the New York City area using total event simulations. *Ecological Modelling*.
- Willmott, C. J. (1982). Some Comments on the Evaluation of Model Performance.
- Yang, S. H. (2016). *Análise das condições ambientais e da dispersão de plumas de efluentes na região costeira centro-sul do estado de São Paulo com uso da Modelagem Numérica*. Ph. D. thesis, Universidade de São Paulo.
- Zembruscki, S. G. (1979). Geomorfologia da margem continental sul brasileira e das bacias oceânicas adjacentes. *Geomorfologia da margem continental sul brasileira e das áreas oceânicas adjacentes. Rio de Janeiro, PETROBRAS. CENPES. DINTEP (Série Projeto REMAC NUM. 7).*
- Zhang, X.-Y. (1995). *Ocean Outfall Modelling - Interfacing Near and Far Field Models with Particle Tracking Method*. Ph. D. thesis.

Zhang, X.-Y. e E. E. Adams (1999). Prediction of near field plume characteristics using far field circulation model. *Journal of Hydraulic Engineering* 125(3), 233–241.